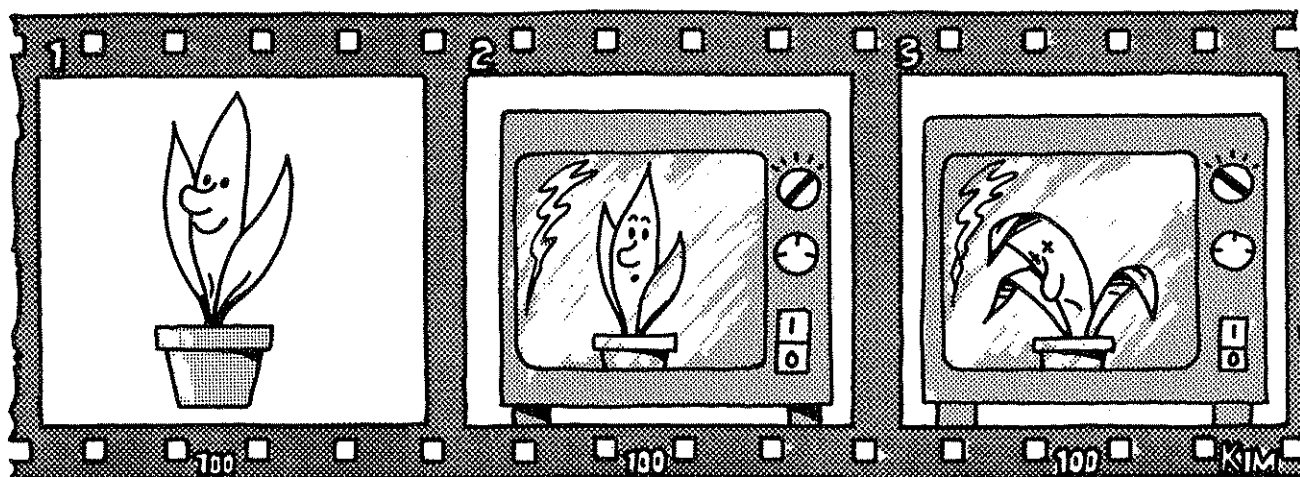


**SVERIGES
LANTBRUKSUNIVERSITET**

MIKROVÅGOR FÖR OGRÄSBEKÄMPNING - en litteraturstudie

**Weed Control by Microwaves
- a Review**

Berit Mattsson



Institutionen för lantbruksteknik

**Swedish University of Agricultural Sciences
Department of Agricultural Engineering**

Rapport 171

Report

Uppsala 1993

ISSN 0283-0086

ISRN SLU-LT-R--171--SE

DOKUMENTDATABLAD för rapportering till SLUs lantbruksdatabas LANTDOK,
Svensk lantbrukshibliografi och AGRIS (FAO:s lantbruksdatabas)

Institution/motsvarande Institutionen för lantbruksteknik		Dokumenttyp Rapport	
		Utgivningsår 1993	Målgrupp F & R
Författare/upphov Mattsson, B.			
Dokumentets titel Mikrovågor för ogräsbekämpning - en litteraturstudie Weed Control by Microwaves - a Review			
Ämnesord (svenska och /eller engelska) non-chemical weed control microwave radiation weed seeds weeds			
Projektnamn (endast SLU-projekt)			
Serie-/tidskriftstitel och volym/nr Sveriges lantbruksuniversitet Institutionen för lantbruksteknik Rapport nr 171		ISBN/ISRN SLU-LT-R--170- -SE ISSN 0283-0086	
Språk Svenska	Smf-språk Svenska, engelska	Omfång 48 s	Antal ref. 31

Postadress

Besöksadress

Telefonnummer

Telefax

SVERIGES LANTBRUKSUNIVERSITET
Utlunabiblioteket, Förvärvsavdelningen/LANTDOK
Box 7071
S- 750 07 UPPSALA
Sweden

Centrala Utluna 22 018-67 10 00 vx 018-3010 06
Uppsala 018-671103

ABSTRACT

This review considers whether or not weed control by microwaves could become a practical non-chemical field weed control method. Although interesting and possessing particular advantages, it will probably only be used in specialised circumstances due to high energy consumption, fluctuating treatments and safety hazards.

FÖRORD

För att kunna avstå från kemiska medel för ogräsbekämpning krävs effektiva alternativ. Olika termiska metoder finns dokumenterade i litteraturen, men den enda termiska metod som i praktiken används i Sverige är flamning. Därför har det bedömts vara intressant att göra sammanställningar av försöksresultat för andra termiska ogräsbekämpningsmetoder, tex mikrovågsbehandling.

Försök med mikrovågor för ogräsbekämpning har främst genomförts under 70- och 80-talen. Det som gör mikrovågor speciellt intressanta är möjligheten att bekämpa ogräsfrön som finns begravda nere i jorden.

Målet för projektet har varit att göra en bedömning av metodens användbarhet med hjälp av de försöksresultat som finns dokumenterade. Projektet har finansierats av Statens Jordbruksverk.

Inom projektets ramar har också ett seminarium om mikrovågor för ogräsbekämpning genomförts i Alnarp. Ett stort tack till samtliga deltagare vid seminariet och ett speciellt tack till gästföreläsaren Dr M.F. Diprose från University of Sheffield i England.

Jag vill rikta ett stort tack till Bo E. Hansson, Fluxtec AB, som bidragit med teknisk kompetens och till Thomas Nybrant vid Institutionen för lantbruksteknik som kommit med värdefulla synpunkter på rapporten. Ett stort tack också till Susanne Ljungberg vid Avd. för park- och trädgårdsteknik som ansvarat för slutredigering av rapporten.

Under arbetet med detta projekt har kontakter knutits med Institutionen för radiofysik vid Lunds Universitet. Denna institution samarbetar med Wallenbergs-laboratoriet när det gäller utveckling av elektriska bekämpningsmetoder mot cancerceller. Några av dessa metoder, elektroporation och exponering med högfrekvent elektrisk ström, kan också vara av intresse som metoder för ogräsbekämpning. Institutionen för lantbruksteknik och Institutionen för radiofysik planerar ett gemensamt projekt där dessa elektriska metoder skall testas på växtceller.

Det handlar alltså om överföring av kompetens och metodik från cancerforskning till forskningsområdet icke-kemisk ogräsbekämpning. Om någon av metoderna visar sig fungera väl, så kan detta leda till en ny intressant utveckling av nya metoder för ogräsbekämpning.

Alnarp i mars 1993

Berit Mattsson

SAMMANFATTNING

Behovet av icke kemiska metoder för ogräsbekämpning är mycket stort. Under 70- och 80-talen pågick en hel del forskning när det gällde möjligheten att använda mikrovågor för ogräsbekämpning. Målet för det här projektet har varit att klarlägga om fortsatt forskning med mikrovågor för ogräsbekämpning bör övervägas. Därför genomfördes denna litteraturstudie.

Det har gjorts försök med mikrovågsbehandling både på frön och växande plantor. Experimenten har oftast genomförts i laboratorium men ibland också i fältförsök.

Fördelen med denna metod är att även ogräsfrön nere i jorden kan behandlas. Det finns ingen annan icke-kemisk metod som kan användas för detta. Mikrovågor kan tränga ner i jorden och värme utvecklas. Det talas om atermiska effekter men det som orsakar att fröna skadas torde vara uppvärmningen.

De flesta experimenten som finns redovisade har gjorts med 2450 MHz och en del vid 915 MHz. Ju lägre frekvens desto bättre är inträngningsförmågan. För ogräsbekämpning vore det alltså önskvärt med lägre frekvens, men det är endast tillåtet att använda 2450 MHz i Sverige.

Utifrån redovisade försöksresultat är det svårt att dra några säkra slutsatser om metodens användbarhet. Försöken har genomförts under så skilda förutsättningar. Olika mikrovågsaggregat har använts och man har gjort experimenten med olika ogräsarter, olika jordar och vattenhalter. Dessutom har energiförbrukningen mätts på olika sätt, men man kan säga att den genomgående varit hög.

Jordens vattenhalt är avgörande för värmeutvecklingen i jorden. Värmen utvecklas först där vattenhalten är hög. Det ideala vore alltså att frönas vattenhalt var högre än den omgivande jordens. Tyvärr brukar det inte vara så. Normalt har frön och omgivande jord ungefär samma vattenhalt. Detta innebär att också den omgivande jorden måste värmas, vilket leder till att metoden blir energikrävande.

Jordens beskaffenhet avgör hur stort behandlingsdjupet blir. Jorden brukar inte vara jämn, vilket kommer att göra effekten av behandlingen ojämn också. På grund av säkerhetsrisker kommer det nog inte att bli aktuellt med fältmaskiner för ogräsbekämpning.

Det är mer troligt att behandling med mikrovågor kommer att användas för jord för planteringar.

Användning av ogräsfri jord skulle vara värdefull eftersom kostnaderna för handrensning skulle kunna minskas. Därför är mikrovågsvärmning intressant som jordbehandlingsmetod.

SUMMARY

There is a growing demand for non-chemical weed control methods at the moment. During the 1970's and 1980's research was performed on weed control with microwaves, although the method was never put to practical use. The objective of this project has been determine whether or not further research into this technique should be considered. This paper reviews the subject and assesses, from the literature, its viability.

Weed control experiments have been reported both on seeds and on plants, and in some cases field trials have been carried out.

An important advantage of using the microwave method is the possibility of controlling seeds buried in the soil. This cannot be achieved by any other non-chemical weed control process. Heat is generated when the microwaves are absorbed by the media they are irradiating. Although non-thermal effects have been discussed the lethal effects in weed seeds seem to be caused by heat.

Most experiments have been carried out at frequencies of 915 MHz and 2450 MHz. The penetration of microwaves is more efficient at lower frequencies. Swedish regulations, however, only allow 2450 MHz to be used.

The results reported in the reviewed articles are not very consistent. The experiments were carried out in different circumstances using different equipment with widely varying weed species and in differing soil types with various moisture contents. Although the energy consumption has been measured in different ways, all the results, without exception, report high values.

The heat distribution in the soil is partly determined by soil moisture content. More heat is generated in areas of high moisture levels than in low ones. It would be ideal if weed seeds had a higher moisture content than the surrounding soil, since they would be heated first. Unfortunately this is not the case as they both tend to have similar moisture content. The surrounding soil mass, therefore, is heated simultaneously with the seeds which makes energy consumption high.

Soil properties as well as moisture contents determine the depth of treatment. Since these vary in a field the depth of treated soil and hence the effectiveness of the method will also fluctuate. In addition the microwave power output required for weed control in the field is very high and could be hazardous.

Microwaves are more likely to be used in specialised circumstances, e.g. the treatment of soil for urban forestry sites. This means the soil can be transported to a microwave oven which makes it safer and more efficient than field treatment. The use of weed free soil would be valuable since it would decrease hand weeding costs and mean less competition for plants during establishment.

Field weed control by microwaves is unlikely to become a common practice but soil treatment and similar applications of microwaves are of great interest.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

INLEDNING	1
MIKROVÅGSTEKNIK	3
Mikrovågor	3
Elektromagnetiska vågor	3
Värmningsmekanismer	5
Vad är värme?	5
Hur bildas värmen?	5
Vanlig uppvärmning	7
Mikrovågornas inträngningsdjup	7
Värmetransport	8
Allmänt	8
Ledning	8
Konvektion	9
Värmestrålning	9
Förångning	9
Värmning av vattenhaltig produkt	9
Vattenmolekylen	9
Mikrovågsvärmning av vattenhaltiga produkter	10
Effekter på levande organismer	10
Mikrovågsaggregat	11
Systemuppbyggnad	11
Mikrovågsgenerator	12
Kraftaggregat	12
Styrsystem	13
Applikator	13
Överföring med vågledare	15
Cirkulatorer och vattenlast	15
Energiförbrukning	16
Regler och förordningar	16
Tillåtna frekvenser	16
Säkerhet	16
OGRÄSBEKÄMPNING MED MIKROVÅGOR	18
Ogräsbekämpningsmetoder	18
Mekanisk ogräsbekämpning	18
Termisk ogräsbekämpning	18
I vilka situationer kan det vara aktuellt med mikrovågor för ogräsbekämpning?	19
Bekämpning av ogräsfrön	19
Laboratorieförsök med behandling av ogräsfrön - litteraturstudie	21
Laboratorieförsök med behandling av ogräsplantor - litteraturstudie	32
Fältförsök med behandling av ogräsfrön	36
Teoretiska modeller för mikrovågsbehandling av ogräsfrön i jord	42
DISKUSSION	44
REFERENSER	46

INLEDNING

Både inom den yrkesmässiga odlingen och inom park- och grönyteförvaltningarna finns en strävan efter att minska eller helt utesluta användningen av kemiska bekämpningsmedel. Under senare år har man blivit alltmer uppmärksam på att användning av kemiska bekämpningsmedel kan vara förknippad med miljö- och arbetsmiljörisker. Detta har lett till att antalet tillåtna preparat för bl a ogräsbekämpning har minskat drastiskt.

Det finns yrkesodlare som valt att inte alls använda kemiska ogräsmedel, s k herbicider, medan många andra försöker begränsa användningen. Den största delen av landets kommuner har valt att helt förbjuda herbicidanvändning på kommunal mark; år 1990 hade 220 av landets kommuner som infört totalförbud. Dessutom har de flesta ogräsmedel som tidigare var tillåtna för användning på urbana ytor nu dragits in.

Behovet av andra metoder för ogräsbekämpning är mycket stort. Det finns en rad olika icke-kemiska metoder som är mer aktuella än någonsin. De icke-kemiska metoderna brukar delas upp i mekaniska och termiska metoder. Vid mekanisk ogräsbekämpning skadar man ogräsplantans ovanjordiska delar och rötter rent fysiskt t ex med hjälp av en ogräshacka eller jordfräs. Vid termisk ogräsbekämpning hettar man upp eller kyler ner ogräsplantorna till temperaturer där cellstrukturen förstörs.

Mikrovågsbehandling är en form av termisk ogräsbekämpning. Det som skiljer denna metod från andra uppvärmningsmetoder är den goda inträngningsförmågan. I en kropp som värms upp med mikrovågor utvecklas värme också inne i själva kroppen. Detta innebär bland annat att det är möjligt att bekämpa ogräsfrön som ligger en bit ner i jorden.

Kunskap om de biologiska förutsättningarna, såsom olika ogräsarters förökning och livscykel, är nödvändig för att klara ogräsproblemen med hjälp av icke-kemiska metoder. Ingen enskild icke-kemisk metod för ogräsbekämpning kommer att lösa alla problem. Istället blir det nödvändigt att utveckla system av olika bekämpningsmetoder. Troligen kan mikrovågstekniken bli en av de pusselbitar som kan användas i dessa system.

Mikrovågsvärmning kräver mycket energi. I situationer där det går bra att välja någon annan bekämpningsmetod, så är det troligen bättre. Men det finns exempel där det inte finns någon väl fungerande metod, där mikrovågstekniken skulle kunna komma till användning. Det skulle exempelvis kunna vara möjligt att behandla bara den del av ytan där såraden sedan skall vara. På så sätt skulle kulturväxten få en smal remsa av ogräsfri jord att växa i. Ett annat exempel där det skulle kunna vara aktuellt med mikrovågor för att djupbehandla och eliminera

ogräsfrön är ytor i stadsmiljö där man vill ha bort all vegetation, som på grusgångar. På sådana ytor är man tvungen att ständigt upprepa behandlingarna under säsongen. Det är givetvis kostsamt med upprepade behandlingar och långtidseffekten hos en mikrovågsbehandling skulle kunna uppväga den höga energikostnaden och kostnaden för avancerad teknisk utrustning.

Det är mot denna bakgrund som vi funnit det intressant att närmare studera möjligheten att använda mikrovågor för ogräsbekämpning. Lyckligtvis så finns det en rad undersökningar gjorda på olika håll i världen. De flesta av dessa undersökningar gjordes under 1970-talet. De gav inte upphov till någon praktisk användning av metoden, men det kan bero på att man vid den tiden hade riklig tillgång till kemiska bekämpningsmedel. Dessa var svåra att konkurrera med; det fanns medel med långtidseffekt och kemisk bekämpning var relativt billig.

Situationen har förändrats avsevärt sedan 1970-talet, inte minst i Sverige. Därför är det dags att ta upp frågan: Är mikrovågsbehandling en metod som kan vara användbar för oss? Denna rapport skall förhoppningsvis kunna ge ett svar på den frågan.

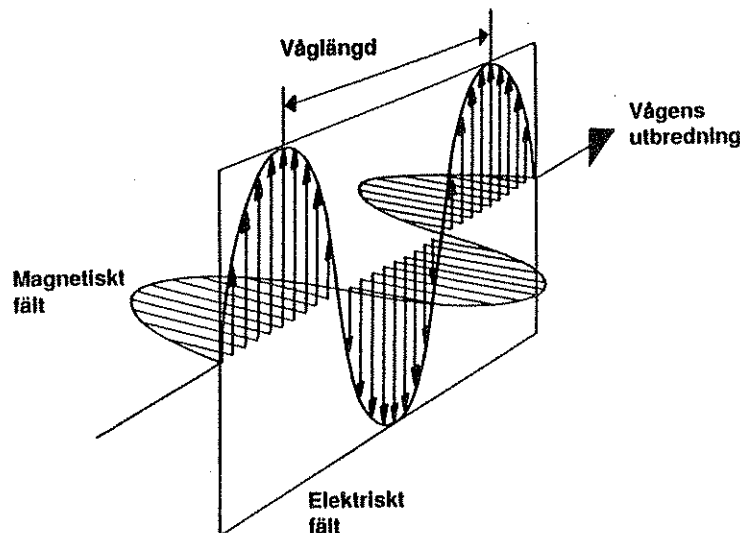
MIKROVÅGSTEKNIK

Mikrovågor

Elektromagnetiska vågor

Detta kapitel handlar om mikrovågsteknik och är till stora delar hämtat ur ett kompendium från kursen "Industriell mikrovågsvärmning" författat av Berndt och Söderhjelm (1991).

Elektriska svängningskretsar alstrar elektromagnetiska vågor, där energin pendlar mellan elektriska och magnetiska fält (se figur 1). Ett exempel på detta är mikrovågor som bildas i en magnetron där elström leds genom ett elektriskt och magnetiskt fält och omvandlas till mikrovågsenergi.



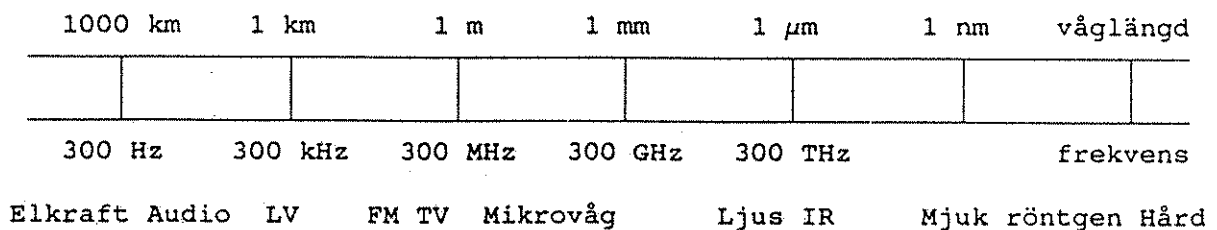
Figur 1. Elektromagnetiska vågor består av elektriska och magnetiska fält (Svennebrink).

Elektromagnetiska vågor karakteriseras av sin våglängd och frekvens. Vågorna breder ut sig med ljusets hastighet.

Till skillnad från ljudvågor så behövs inte något medium för att vågorna skall kunna ta sig fram. Mikrovågorna kan tränga igenom gaser, vätskor och fasta ämnen. Om de då dämpas så överförs energi till det aktuella ämnet, och energin omvandlas till värme. Det är detta som händer i en vanlig mikrovågsugn som används i hushållen. Ett ämne som dämpar mikrovågor kallas ett *dielektrikum*.

Olika ämnen har olika dielektriska egenskaper, d v s förmåga att omvandla energin till värme. Det är något som man kan observera då man använder en mikrovågsugn; att en del kärl blir så varma att man inte kan röra vid dem utan att bränna sig, medan andra kärl bara blir lite uppvärmda.

De vågor som kallas elektromagnetiska vågor spänner över ett brett spektrum; från elkraft (50 Hz) till röntgen och partikelstrålning (10^9 MHz). Om man istället uttrycker det i våglängd, så varierar de mellan delar av en nanometer till tusentals kilometer. Mikrovågor kallas de vågor som har en våglängd på mellan 1 mm och 1 m. De vågor som normalt används för industriell uppvärmning och som används i vanliga hushållsugnar har en frekvens på 2450 MHz och en våglängd på ca 1 dm. I vissa industriella sammanhang förekommer också att man använder 915 MHz (se figur 2).



Figur 2. De elektromagnetiska vågornas spektrum (Berndt & Söderhjelm, 1991).

Sambandet mellan vågornas hastighet, längd och frekvens är följande:

$$c = l \cdot f$$

där c är ljushastigheten, l är våglängden och f är frekvensen.

I vakuum är ljushastigheten $3 \cdot 10^8$ m/s. I andra medier är hastigheten lägre och våglängderna mindre. Frekvensen ändras nämligen inte då vågen når ett annat medium.

Värmningsmekanismer

Vad är värme?

Värme är den rörelseenergi som finns hos molekylerna i materia. Denna inre energi motsvarar alltid en bestämd temperatur hos ämnet ifråga. Ett annat ämne som har samma inre energi kan dock ha en helt annan temperatur.

När elektromagnetiska vågor dämpas så omvandlas energin till värme. Värmning med mikrovågor skiljer sig från andra uppvärmningsmetoder. Mikrovågornas speciella värmningsegenskaper medför fördelar i vissa situationer.

- * Värme skapas inuti det material som dämpar mikrovågorna.
- *Värmen behöver inte ledas in från ytan mot centrum av lasten (d v s objektet som skall värmas).
- * Man har ingen termisk tröghet vid uppvärmning med mikrovågor.

Hur bildas värmen?

I ett dielektriskt ämne finns alltid partiklar som inte är elektriskt neutrala. Detta innebär att ämnet kan polariseras. När en elektromagnetisk våg passerar så bildas ett elektriskt fält. Då kommer de positiva laddningarna röra sig mot den negativa sidan av fältet och de negativa åt det andra hållet. Dipoler, d v s partiklar som har en negativ och en positiv del, kommer att orientera sig i fältet med den positiva delen mot fältets negativa sida.

Det elektriska fältets polaritet kastas om 2 gånger per period, d v s ca 5 miljarder gånger per sekund, då vågorna har en frekvens på 2450 MHz. Varje gång fältet kastas om ändrar de laddade partiklarnas rörelseriktning och dipolerna vrids 180 grader. Vid partiklarnas rörelse uppstår krockar och partiklar gnids mot varandra, vilket ger upphov till friktionsvärme inne i materialet. Det är denna friktion tillsammans med rena ledningseffekter, s k ohmska förluster, som omvandlar den elektromagnetiska energin i vågen till värme.

Parametrar som är viktiga för värmningen är:

- * materialets dielektriska egenskaper,
- * mikrovågornas frekvens,
- * temperaturen vid början av och under uppvärmningen,
- * produktens geometriska form.

Dielektricitetsfaktorn kan ses som ett mått på hur mycket elektrisk energi ett ämne kan lagra, och förlustfaktorn som ett mått på hur mycket energi som materialet kan omvandla till värme. Faktorerna varierar för olika frekvenser.

Vatten går bra att värma, vilket vi återkommer till senare. *Plaster* har olika sammansättning och därmed olika uppvärmningsegenskaper. *Gummi* kan värmas med mikrovågor, vilket utnyttjas i industrin. *Metaller* värms vanligen inte eftersom mikrovågorna reflekteras istället för att tränga in i materialet. Det är dock möjligt att värma ett mycket tunt metallskikt. Ett exempel på detta är att frusna pizzor levereras på en platta med ett tunt skikt av aluminiumfolie. På detta sätt kan man selektivt värma undersida av pizzan mer än andra delar av den.

Det specifika värmnet är ett mått på hur mycket energi per kg av ett visst ämne som måste tillföras för att öka temperaturen 1 °C. Specifika värmnet varierar mycket mellan olika material. *Vatten* har ett mycket högt värde. När en kropp som består av flera olika material med olika specifikt värme värms upp, så kan stora temperaturskillnader uppstå även om absorptionen av mikrovågor är jämn.

Produktens geometriska form har stor betydelse för hur energin i mikrovågsfältet absorberas. Vågornas reflektion vid övergång mellan olika medier har betydelse. Det har också det faktum att vågorna träffar lasten från olika håll i hörn och vid kanter. Detta leder till att hörn och kanter värms snabbare än de centrala delarna.

Materialegenskaperna kan förändras kraftigt vid olika fasövergångar, vid någon viss temperatur eller frekvens. För en del ämnen ökar förlustfaktorn (mått på hur stor mängd energi som kan omvandlas till värme i ett material) kraftigt vid en viss temperatur. Tillförd mikrovågsenergi kommer då att selektivt värma de redan varmare områdena. Detta leder till överhettning, s k termisk rusning. Man kan undvika termisk rusning genom att minska tillförseln av mikrovågsenergi så att värmen hinner ledas bort.

För många material förändras förlustfaktorn kraftigt när materialets vattenhalt förändras. Detta beror på att fritt respektive bundet vatten har olika egenskaper. Vid höga vattenhalter påminner värmningsegenskaperna om dem för vatten. Vid låg vattenhalt är dielektricitetsfaktorn lägre (d v s förmågan att lagra energi sämre) och förlustfaktorn lägre. Vattenhalten har alltså stor betydelse för värmningsegenskaperna.

Vid värmning med mikrovågor kan det elektromagnetiska fältet slås på och av så gott som momentant. Detta medför att man får mycket korta start- och stopptider och att man får en snabb och precis reglering av värmningen.

Egenskaper som ledningsförmåga, laddningseffekter i heterogena material och dipoleffekter påverkar förlustfaktorn. I de frekvensområden som används för mikrovågsvärmning är dipoleffekter och joner oftast avgörande. Det finns tabeller för materialegenskaper där dielektricitets- och förlustfaktorn anges för olika material. På så sätt är det på förhand möjligt att avgöra om ett material lämpar sig för mikrovågsuppvärmning.

Vanlig uppvärmning

När man använder konventionella värmningsmetoder måste värmen först tillföras ytan. Sedan leds den in i materialet genom att en utjämning av temperaturen sker. Uppvärmningen sker därför relativt långsamt. Det krävs högre temperatur vid ytan på objektet som skall värmas upp för att temperaturen skall bli lagom i mitten av materialet.

Mikrovågornas inträngningsdjup

Under mikrovågornas väg in i materialet omvandlas energin successivt till värme, vilket innebär att ju längre in från ytan man kommer desto mindre energi återstår.

Mikrovågornas förmåga att tränga in är olika för olika material. Inträngningsdjupet är en viktig parameter när man skall bedöma om ett ämne lämpar sig för mikrovågsvärmning. I ett ämne där vågorna dämpas kraftigt blir inträngningsdjupet litet. Man får en kraftig uppvärmning av ytan, medan endast lite energi kvarstår för uppvärmning av materialets inre delar.

I material där mikrovågorna har ett stort inträngningsdjup finns mer energi kvar för uppvärmning av de inre delarna av objektet som skall värmas. Men om inträngningsdjupet är stort är risken för att stående vågor bildas också stor. Detta beror på att en del av den elektromagnetiska vågen reflekteras då den når en gränssyta mellan olika medier. Då den reflekterade vågen sammanlagras med den

inkommande vågen bildas en stående våg. Om den infallande och den reflekterade vågen är i fas förstärker de varandra, men om de är i motfas motverkar de varandra. Lokala maxima och minima i effektutvecklingen uppstår då i materialet så att uppvärmningen blir ojämn.

Inträngningsdjupet är också beroende av ett ämnes konduktivitet. Dessutom har frekvensen stor betydelse för inträngningen. Om man jämför några vanliga frekvenser för värmning, 2450 MHz och 900 MHz, så är inträngningsdjupet nästan 3 gånger större för den senare frekvensen. Ju större våglängd desto större inträngningsdjup. Men samtidigt ökar risken för att stående vågor uppstår, vilket leder till ojämn uppvärmning. För att minska risken för ojämn uppvärmning kan man se till att produkten rör sig genom fältet. En annan möjlighet är att utsätta produkten för olika vågmönster, så att summan av de olika mönstren blir ganska jämnt även om de enskilda mönstren är ganska ojämna (s k multimode ugn).

Värmetransport

Allmänt

Efter att mikrovågsenergin omvandlats till värme så sprids värmen i produkten med hjälp av vanlig värmetransport.

Värme kan transporteras genom ledning, konvektion, värmestrålning och genom att fasomvandlingar sker. Detta kan exempelvis ske genom att vätska förångas, ångan förflyttas för att sedan kondenseras.

Här följer en kortfattad beskrivning av olika former av värmetransport.

Ledning

Olika material har olika förmåga att leda värme. Metaller är goda värmeledare medan isoleringsmaterial som stenum eller frigolit är dåliga ledare. Luft är också en dålig ledare, vilket ofta utnyttjas genom att isoleringsmaterial är poröst och innehåller mycket luft.

Värmetransport genom ledning sker genom vibrationer och smårörelser på molekyl- eller kristallnivå. Värme leds från en högre temperatur till en lägre. Ju större temperaturskillnad desto snabbare leds värmen. Ju längre sträcka som värmen skall transporteras desto längre tid tar transporten.

Konvektion

Konvektion förekommer i gaser och i vätskor och innebär att värmen transporteras genom att det uppvärmda materialet strömmar iväg. Materialen bär alltså med sig värme vid förflyttningen.

Konvektion är vanligast vid värmeövergång över gränssytor mellan olika medier, till exempel fast fas och vätskefas samt vätske- och gasfas.

Värmestrålning

Värmestrålning är en form av elektromagnetisk strålning och den kallas ofta för infraröd strålning, efter våglängden.

Varje yta sänder ut och tar emot värmestrålning. En varm och en kall yta som placerats mitt emot varandra sänder båda ut och tar emot strålning från varandra. Strålningens nettoflöde blir dock positivt endast för den kallare.

Förångning

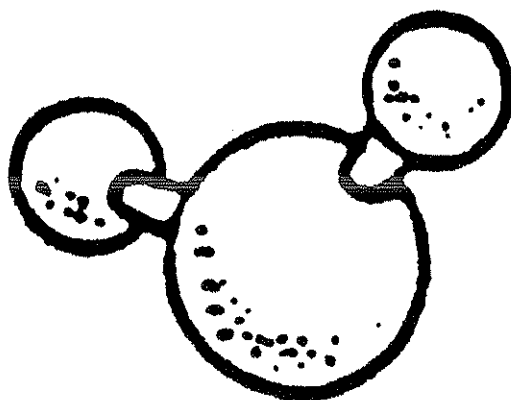
Om man värmer upp en last som innehåller vätska med mikrovågor, så kommer vätskan att avdunsta från ytan. Då kommer den uppvärmda lasten att torka. Energin för torkningen tas från mikrovågor. Från början åtgår effekt för avdunstning från ytan, först därefter får man någon större uppvärmning av kroppen.

Om det finns vätska kvar längre in i kroppen kommer överhettning hindras genom att vätskan förångas. När temperaturen blir så hög att förångningen startar åtgår den största delen av energin för ångbildning. Ångan kommer först att kondensera på andra platser i kroppen där temperaturen ännu ej nått så högt. En kraftig utjämnande värmetransport kommer igång på detta sätt. Många produkter är dock känsliga för höga temperaturer, och kan förstöras vid temperaturer långt under 100 °C.

Värmning av vattenhaltig produkt

Vattenmolekylen

Vatten består av väte och syre. Väteatomerna är positivt laddade och syreatomen negativt laddad. Vattenmolekylen är inte linjär vilket innebär att den är en dipol, dvs att den har en negativt laddad och en positivt laddad del (figur 3).



Figur 3. Vattenmolekyler.

Vätebindningarna gör att vattenmolekylerna är sammansatta i tredimensionella grupper med fria vattenmolekyler emellan. Då temperaturen ökar bryts vätebindningarna upp, grupperna av vattenmolekyler blir mindre och antalet fria vattenmolekyler ökar. Dielektricitetsfaktorn minskar med ökande temperatur, vilket innebär att vattnets förmåga att lagra elektrisk energi minskar.

Då det finns elektriskt laddade partiklar, joner, i en vattenlösning kommer vattenmolekylerna att orientera sig kring dessa och motverka laddningen.

Mikrovågsvärmning av vattenhaltiga produkter

I produkter med hög vattenhalt, t ex livsmedel, kommer värmningen bero på dipoleffekter och joneffekter. Värdena för dielektricitets- och förlustfaktorerna kommer att ligga nära värdena för vanligt vatten.

I produkter med låg vattenhalt kommer dielektricitets- och förlustfaktorerna att anta helt andra värden. Lokalt kan jonkoncentrationen vara mycket hög med åtföljande hög förlustfaktor. Även om elektrolytkoncentrationen är låg så kan dielektricitets- och förlustfaktorerna vara annorlunda om vattnet är fysikaliskt bundet. För att kunna uppskatta effekterna av mikrovågor bör det aktuella materialet undersökas under realistiska förhållanden.

Effekter på levande organismer

Levande organismer påverkas av mikrovågor genom att de värms. Värmebehandling med mikrovågor, diatermi, är en välkänd medicinsk teknik som används både för djur och människor.

Pastörisering och sterilisering av livsmedel kan åstadkommas med hjälp av mikrovågsvärmning. Effekten beror i första hand på tid och temperatur precis som vid användning av andra metoder. Men i många undersökningar har man fått betydligt sämre effekt av mikrovågsvärmning än med konventionella värmningstekniker. Enligt Berndt & Söderhjelm (1991) beror detta ofta på mätfel. Temperaturen i en produkt i ett mikrovågsfält går att mäta, men det krävs dyrbar mätutrustning. Därför har mätningarna ofta gjorts efter att produkten tagits ut ur ugnen. Författarnas bedömning är att detta ofta leder till att man överskattar temperatur och värmningstid.

Enligt Hansson (pers med, 1992) kan de dåliga resultaten också bero på att mikrovågor använts i situationer där andra uppvärmningsmetoder vore lämpligare. Mätning under uppvärmning i ett mikrovågsfält kan göras med fiberoptiska element. En komplett mätutrustning kostar ca 300 000 kr.

Sedan mikrovågor började användas har man diskuterat om det finns några atermiska effekter eller inte. Det finns undersökningar som pekar på att det finns effekter som inte enbart kan förklaras med temperaturhöjningen, men det finns också undersökningar som pekar på motsatsen. Svårigheten att mäta eventuella atermiska effekter gör att man oftast bortser ifrån eventuella sådana. Det är känt att starka elektromagnetiska fält kan påverka levande organismer. Frågan är om fältstyrkan är tillräcklig för att effekten skall vara påvisbar.

Mikrovågsaggregat

Systemuppbyggnad

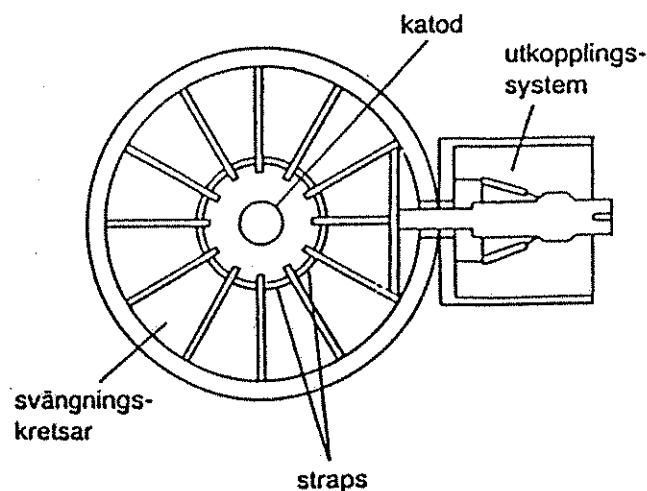
Ett mikrovågssystem är uppbyggt av en rad olika komponenter. Systemet börjar oftast med elektrisk ström från elnätet och slutar som värme i lasten. Omvandlingen sker på följande sätt:

1. Växelström från nätet omvandlas till högspänd likström i ett kraftaggregat.
2. Kraftaggregatet stabiliserar effekten till önskad nivå.
3. I mikrovågsgeneratoren (vanligen en magnetron) omvandlas elektrisk energi till mikrovågsenergi.
4. En vågledare överför mikrovågorna till applikatoren (utrymmet där mikrovågorna överförs till produkten kallas applikator).

Mikrovågsgenerator

För uppvärmning med mikrovågor används två typer av generatorer; magnetroner och klystroner. Den som används mest är magnetronen eftersom den är billig och kompakt och har bättre verkningsgrad än klystronen. Verkningsgraden hos magnetron respektive klystron är 70% respektive 60%. Fördelen med klystronen är att den kan ge hög effekt och används därför där detta är ett krav.

I magnetronen går en elektronström fram i elektriska och magnetiska fält där den omvandlas till mikrovågsenergi. Magnetronens svängningsfrekvens bestäms dels av de elektriska och magnetiska fälten, dels av de inbyggda svängningskretsarna (se figur 4).



Figur 4. Bild av en magnetron i genomskärning (Svennebrink).

För att skapa magnetfältet används antingen permanentmagneter eller elektromagneter. Mindre magnetroner brukar ha permanentmagneter medan större har elektromagneter. Generellt kan man säga att magnetron används vid 2450 MHz och klystron vid 915 MHz.

Förlusteffekten i magnetronen måste kylas bort. På mindre magnetroner räcker det med flätkylning, men på större aggregat krävs vattenkylning.

Kraftaggregat

Kraftaggregatet förser magnetronen med högspänd likström. Det består av transformator, likriktare och styrutrustning.

För att magnetronen eller klystronen skall fungera krävs höga likspänningar. För en liten magnetron krävs 3-4 kV, medan det för en 3 kW magnetron krävs 7 kV och ännu större magnetroner och klystroner kräver 10-20 kV spänning.

Styrsystem

Om en låg spänning läggs på en magnetron så händer ingenting. Spänningen måste upp i en viss nivå, så kallad knäspänning, innan magnetronen börjar oscillera och mata ut effekt. När man kommit över knäspänningen ökar strömmen snabbt med ökande spänning.

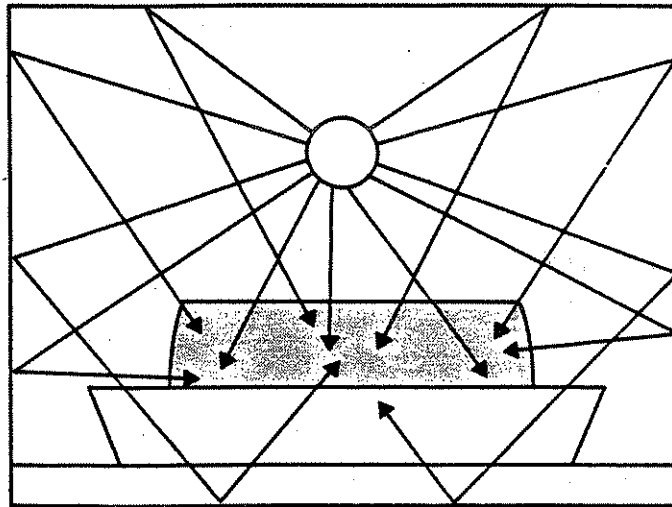
Knäspänningen kan vara olika för olika magnetronexemplar. Den kan förändras vid ändrad temperatur och när magnetronen åldras. Även om spänningen hålls konstant kan därför uteffekten variera. För att undvika detta används styrutrustning för att stabilisera strömmen genom magnetronen. Oftast finns inte krav på att effekten skall vara exakt, och då räcker det med ett enkelt stabiliseringsdon.

Applikator

Applikatorn är den del av mikrovågssystemet där mikrovågsenergin fördelas och överförs till materialet som skall värmas. Mikrovågsenergens fördelning i applikatorn påverkar värmefördelningen.

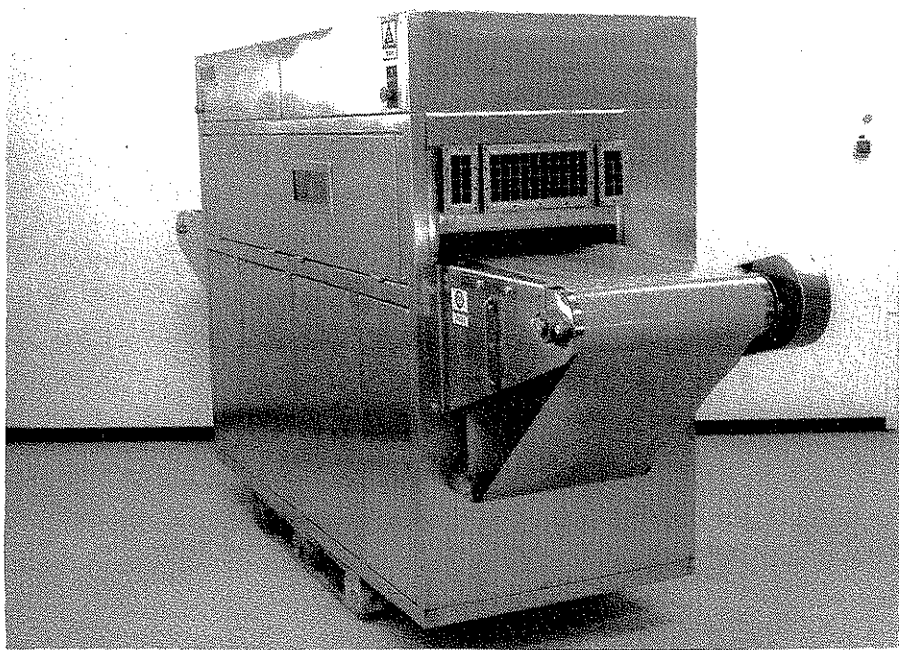
Man försöker utforma applikatorn på ett sådant sätt att all mikrovågseffekt kommer produkten till godo som värme och att den appliceras så jämnt som möjligt. Applikatorn anpassas till magnetronen för att minimera den reflekterade effekten. Detta går bra när man värmer medier med stora förluster, som tar åt sig mycket energi som omvandlas till värme. Reflektionen kan bli stor då man försöker värma material med små förluster. De reflekterade vågorna skadar magnetronen. Det är därför som man skall undvika att köra en hushållsugn utan någon produkt som kan ta upp energin. I industriella sammanhang finns det dock möjlighet att anpassa utrustningen så att den reflekterande effekten minimeras.

Mikrovågsenergin har en tredimensionell fördelning i applikatorn. Vågorna reflekteras både mot metallväggar och mot lasten. Det blir alltså en komplicerad fördelning av mikrovågorna i applikatorn. Om lasten är stillastående, får man en tredimensionell värmebild. Om lasten istället transporteras genom applikatorn jämnas fördelningen ut i transportriktningen.



Figur 5. Den vanligaste typen av applikator är kavitetsugn. Hushållsugnar är av denna typ (Svennebrink).

Den vanligaste typen av applikator är en s k *kavitet* eller kavitetsugn som bland annat används i hushållsugnar (se figur 5). Magnetronen sänder ut mikrovågorna radiellt och sedan reflekteras de mot applikatorns väggar och träffar lasten från olika håll. I en *tunnelugn* transporteras lasten kontinuerligt genom applikatorn på en transportbana (se figur 6). Passagerna in och ut ur ugnen är tillräckligt stora för att produkten skall kunna passera, men är dimensionerad så att inga mikrovågor skall kunna läcka ut. Det finns en typ av applikator som kallas *meandervågledare* och är avsedd för tunna material som papper. Det finns också en s k *ytvågledare* där mikrovågsfältet har tredimensionell fördelning över ytan.



Figur 6. Produkten som skall värmas placeras på en transportör, vilken passerar genom tunnelugnen (Svennebrink).

Överföring med vågledare

En vågledare består av ett metallrör med rektangulärt eller cirkulärt tvärsnitt. Vågledaren dimensioneras efter frekvensen. Vågledarens bredd är lika med halva luftvåglängden för cut-off frekvensen. Cut-off frekvensen är den lägsta frekvens som kan passera genom den aktuella vågledaren.

Det finns olika standardkomponenter för vågledningssystem. Varje komponent är försedd med flänsar för sammanfogning av komponenterna. Vågorna kan inte bara ledas genom raka rör utan även genom krökar.

Cirkulatorer och vattenlast

Om belastningen varierar mycket så att den reflekterade effekten ibland blir stor, kan man isolera magnetronen från lasten med hjälp av en sk cirkulator. Annars finns risk för att magnetronen kan ta skada. Cirkulatorn fungerar som en slags sluss som ser till att vågor inte leds tillbaka till magnetronen. Den reflekterade effekten kan istället slussas vidare till en vattenlast som tar upp energin.

Om man vill mäta framgående och reflekterad effekt kan man använda en rikt-kopplare, där en liten del av effekten kopplas in i en port där den kan mätas.

Energiförbrukning

I vissa fall förbrukas betydligt mindre energi för mikrovågsvärmning än för andra uppvärmningsmetoder, men man kan inte påstå att mikrovågsteknik rent generellt är energisnålare än andra metoder. Man får ut i storleksordningen 50-60% av tillförd eleffekt som nyttig värmeeffekt vid mikrovågsvärmning.

Om det rör sig om intermittenta värmningsförlopp kan mikrovågstekniken vara mer energisnål än andra metoder tack vare att man slipper de förluster uppvärmning och nerkylning av processapparatur och i vissa fall värmetransportmedier innebär.

Ett annat fall där man kan spara stora energimängder är när man bara vill värma en del av lasten, t ex vid limning där man kan värma bara fogen vid användning av mikrovågsteknik. Med konventionell teknik tvingas man värma även omgivande material.

Regler och förordningar

Tillåtna frekvenser

Det är internationella överenskommelser som reglerar vilka frekvenser som får användas för industriell, vetenskaplig och medicinsk användning. Frekvensen 2450 MHz (+/- 50 MHz) får användas i alla länder. Frekvensen 915 MHz är tillåten att använda i Nord- och Sydamerika, men inte här i Sverige. En del försök med mikrovågor för ogräsbekämpning är gjorda med 915 MHz, vilket medför att de inte är tillämpbara för svenska förhållanden. Det pågår dock diskussioner om dessa bestämmelser som eventuellt kommer leda till att frekvensen 915 MHz blir tillåten även i Sverige (Hansson pers med, 1992).

Säkerhet

Vid industriell användning av mikrovågor måste man ta hänsyn till en rad aspekter. Generering av mikrovågor sker vid *hög spänning och strömstyrka*, och utrustningen måste därför vara tillräckligt isolerad och jordad för att uppfylla de normer som gäller (IP 45 eller högre).

Precis som livsmedel skulle mänsklig vävnad som blev utsatt för mikrovågor absorbera energin och omvandla en del till värme. Vid frekvenser under 1 GHz skulle värmningen ske inne i kroppen, medan frekvenser över 3000 MHz främst

skulle värma huden. Mellan 1000-3000 MHz, dvs där frekvensen 2450 MHz ligger, är situationen mer komplicerad. Det är vävnadssammansättningen, bl a mängden underhudsfett, som kommer att avgöra hur uppvärmningen kommer att ske.

Om kroppstemperaturen stiger mer än 5-10 °C så kommer irreversibla förändringar av vävnader att ske. Vävnaden är inte homogen men i genomsnitt är värmeavgivningen från människokroppen under vila ca 100 W/m². Man har tolkat detta som en tolerabel nivå för långtidsexponering. Vävnader med sämre blodförsörjning, dvs sämre värmetransport är känsligare. Speciellt känsliga områden är ögat och testiklarna. Naturligtvis har exponeringstiden en stor betydelse. Vid exponering på mindre än 6 sekunder anses dock att man kan tolerera mer än tiodubbla flödet.

I Sverige finns normer för "Hörfrekventa Elektromagnetiska Fält" som utfärdats av Arbetskyddsstyrelsen, AFS 1987:2. I det frekvensområde som är aktuellt anges maxvärden för exponering till 300 V/m under 1 s och 60 V/m under 6 minuter under sk fjärrfältsförhållanden. Definitionen på fjärrfältsförhållanden är att man skall befinna sig på ett avstånd som är större än 1 våglängd från strålningskällan.

I USA och Storbritannien är gränsen satt till 100 W/m² medan det tidigare Sovjetunionen hade samma gräns som vi för korttidsexponering på under 20 minuter, men successivt sänker denna till 0,1 W/m² vid exponeringar på över 2 timmar. Det finns tyvärr inte någon dokumentation när det gäller eventuella effekter av de olika gränsvärdena i de olika länderna.

Det finns också normer för maximalt tillåtna läckage-nivå för mikrovågsanläggningar. I Europa gäller IEC 335-2-25 som säger att det maximalt får vara ett läckage på 5 mW/cm² på ett avstånd av 5 cm från ytan på utrustningen.

För mätning av värmeeffekten finns mätinstrument för mätning vid 2450 MHz för ca 5000 kr (1991). För andra våglängder krävs mer avancerad utrustning.

Enligt Berndt & Söderhjelm (1991) finns det undersökningar bland annat från f d Sovjetunionen som visar att det finns vissa *atermiska effekter* dvs effekter på människokroppen som inte hör samman med förhöjd kroppstemperatur. Det rör sig om effekter som anses uppstå vid långvarig exponering av fält med låg fältstyrka. Effekterna anges ha varit svåra att dokumentera.

OGRÄSBEKÄMPNING MED MIKROVÅGOR

Ogräsbekämpningsmetoder

I de flesta fall finns det andra metoder som är billigare och enklare att använda än mikrovågsteknik. Användning av kemiska ogräsmedel är ofta billigt och relativt enkelt. Men det är inte alltid man kan eller vill använda kemiska medel. Användningen är begränsad både genom direkta förbud och genom att det inte alltid finns effektiva preparat tillgängliga. Under senare år har det dessutom vuxit fram en medvetenhet om att dessa preparat kan ha negativa effekter ur arbetsmiljösynpunkt och med tanke på den omgivande miljön.

Mekanisk ogräsbekämpning

Exempel på mekanisk ogräsbekämpning är jordbearbetning vid såbäddsberedning och bearbetning med jordfräs i en plantering eller radodlad kultur under kulturtiden. Mekanisk ogräsbekämpning är effektiv om den utförs vid rätt tidpunkt och den är inte alltför kostsam. Svagheten med denna metod är att den inte är selektiv och att kulturväxterna därför måste skyddas. Man kan alltså inte bearbeta jorden ända intill kulturväxterna. Detta medför att en del ogräsplantor blir kvar precis kring kulturväxten där de gör skada genom att de konkurrerar med kulturväxten om vatten, ljus och näring. Dessutom försvårar ogräsen skörden i fältgrödor, och i prydnadsplanteringar är ogräs oacceptabel ur estetisk synpunkt.

Termisk ogräsbekämpning

Termisk ogräsbekämpning är ett samlingsnamn för metoder där man antingen hettar upp eller fryser ner ogräsplantorna kraftigt. Den vanligaste termiska metoden är flamning. Flammor från gasolbrännare hettar upp plantorna så att cellmembranen sprängs, vilket leder till att plantan torkar ut. Det är endast plantans ovanjordiska delar som skadas. Rotogräs har energi lagrad i rotdelar och kan därför snabbt skjuta nya skott. Effekten på fröogräs är ofta god med vissa undantag. Fröogräs som har ett växtsätt som gör att tillväxtpunkten är väl dold av skyddande blad nere vid markytan är svårbekämpade. Även om man lyckas skada de omslutande bladen så finns det risk för att tillväxtpunkten kan klara sig och utveckla nya blad. Det krävs upprepad behandling för att döda plantor med skyddad tillväxtpunkt. (Ascard, 1988)

Det finns termiska metoder med andra värmekällor och överföringsmetoder. Exempel på detta är hetvatten, vattenånga och högspänd elström. Och så mikrovågor förstås!

Exakt vad som orsakar den dödliga effekten av mikrovågor är inte helt klart. Dels handlar det om skador som orsakas av uppvärmningen, men det handlar sannolikt också om annan påverkan. Det krävs ytterligare undersökningar för att klargöra orsakerna till denna. (Davis mfl, 1971)

Enligt Moosemann & Koch (1988) verkar de atermiska effekterna enbart ha betydelse då strålningsintensiteten är låg. Att undersöka de atermiska effekterna är dock komplicerat, då det krävs att man kyler proverna för att man skall kunna skilja mellan de termiska och atermiska effekterna.

Ogräsbekämpning genom att ogräsplantor fryses ner kraftigt förekommer endast på forskningsstadiet. Det är flytande kväve eller kolsyresnö som kan användas som kylmedium. Plantorna kyls ner till extremt låga temperaturer under en ganska kort tid. Det är inte klarlagt exakt vad som sker i växten, men det är troligen så att vätskan fryser inuti cellen så att cellmembranen sprängs. Effekten på ogräsplantorna påminner mycket om effekten av flamning. Olika plantors tolerans mot flamning respektive frysning kan dock vara olika, men energiförbrukningen är generellt lägre för flamning. Med nuvarande priser och teknik blir kostnaden betydligt högre för frysning. I speciella fall kan dock frysning vara ett användbart alternativ redan idag. På ytor där flamning är olämplig därför att eld-faran är stor, t ex parker och bostadsområden, skulle frysning kunna användas. (Fergedal, 1993)

Nackdelar med termisk ogräsbekämpning är att metoden oftast inte är selektiv, den är energikrävande och är förknippad med arbetsmiljöproblem. Det är framför allt risken för att komma i kontakt med upphettade skyddsplåtar eller kylmedia med extremt låga temperaturer som utgör arbetsmiljöproblem. För vissa av dessa metoder föreligger dessutom brandrisk. Trots detta används termisk ogräsbekämpning i vissa specifika sammanhang. Exempel på detta är att det är möjligt att flambehandla ett morotsfält strax före uppkomst. Genom att morotsfrön gror långsammare än de flesta ogräsfrön finns möjlighet att behandla de nyuppkomna ogräsplantorna precis innan de första morotsplantorna börjar komma upp. Ett annat exempel är flamning på hårdgjorda ytor (t ex stensatta ytor) där all vegetation är oönskad. Där kan hela ytan behandlas.

I vilka situationer kan det vara aktuellt med mikrovågor för ogräsbekämpning?

Bekämpning av ogräsfrön

Det krävs förhållandevis avancerad utrustning och kravet på avskärmning är stort för att inte mikrovågorna skall läcka ut och skada andra organismer än de avsed-

da. Om man beaktar mikrovågsanläggningen som energiomvandlare så är den tyvärr inte speciellt effektiv. Verkningsgraden vid omvandling från högspänd elström till nyttig värme-effekt är ca 50-60%. Om man avser att bygga en fältmaskin blir verkningsgraden ännu sämre genom att en omvandling från exempelvis dieselolja till elström blir nödvändig.

Om det enbart rör sig om bekämpning av växande ogräsplantor, så är det möjligt att använda andra metoder som är mindre kostsamma än mikrovågsvärmning. Dessutom finns risk för läckage vid användning av mikrovågor i fält.

Det som framför allt skiljer mikrovågsvärmning från andra uppvärmningsmetoder är inträngningen. Som tidigare nämnts så tränger vågorna in i lasten och värme utvecklas inuti den. Vid direkt värmning av plantor krävs inte att värmen tränger in speciellt långt eftersom växtdelar, t ex blad, är tunna och en upphettning på ytan är fullt tillräcklig för att dödligt skada plantan.

Men det finns en tillämpning där mikrovågornas unika inträngningsförmåga skulle kunna komma väl till pass. Det finns ingen annan icke-kemisk metod där man kan eliminera ogräsfrön. Skulle det kanske vara möjligt att behandla ogräsfrön som ligger nere i jorden så att de inte längre blir livsdugliga? Det finns en del sådana försök genomförda där resultaten finns redovisade. Vi återkommer till detta senare.

I en produkt där olika delar har olika vattenhalt kommer partier med hög vattenhalt värmas upp snabbast. Som tidigare nämnts utnyttjas detta fenomen t ex vid torkning av limmade trädetaljer där värmen från mikrovågorna framför allt utvecklas i det fuktiga limmet. I det här fallet blir mikrovågsvärmning därför en effektivare och mindre energikrävande torkningsmetod än om konventionell uppvärmning skulle ha använts. Då hade det varit nödvändigt att värma hela lasten för att temperaturen skulle bli tillräckligt hög i limfogen.

Om det vore så att vattenhalten i ogräsfröna var högre än i den omgivande jorden så skulle alltså värme först utvecklas i dessa ogräsfrön. Nu är det tyvärr inte alls säkert att det förhåller sig på detta sätt. Om det är tvärt om, att vattenhalten i jorden är högre än i ogräsfröna så skulle dessa istället värmas sist. Det krävs mycket energi för att värma upp både jord och frön. En behandling av hela ytan är därför inte realistisk annat än i undantagsfall. Möjligen skulle man kunna behandla en smal remsa på fältet där kulturväxtens frön sedan sås ut. En annan situation där mikrovågsbehandling skulle kunna vara aktuell är på ytor i stadsmiljö, där flamning eller handrensning används upprepade gånger under säsongen. Även om mikrovågsbehandling är kostsam, så skulle långtidseffekten av behandlingen kunna göra den till ett konkurrenskraftigt alternativ.

En annan svårighet vid mikrovågsbehandling är att jorden inte är homogen och att vattenhalten varierar. Detta leder till att man får ojämnt behandlingsdjup även om dosen av tillförd energimängd per ytenhet är den samma. I praktiken kan detta innebära att man tvingas överdosera, för att man skall få en acceptabel effekt över hela den behandlade ytan (Svennebrink pers med, 1989).

Laboratorieförsök med behandling av ogräsfrön - litteraturstudie

Davies m fl (1971) bestrålade frön från växter av tolv arter i en mikrovågsugn. De växtarter som behandlades var majs (*Zea mays*), jordnöt (*Arachis hypogaea*), en ärtväxt (*Prosopis juliflora*), gurka (*Cucumis sativus*), en kålväxt (*Brassica sp.*), krusskräppa (*Rumex crispus*), (*Echinochloa colonum*), amarant (*Amaranthus sp.*), bomull (*Gossypium hirsutum*), sojaböna (*Glycine max.*), sorgum (*Sorgum vulgare*) och vete (*Triticum vulgare*).

Man bestrålade torra frön, frön som fått absorbera vatten under 4 timmar och frön som fått gro under 46 timmar. Behandlingen genomfördes i en ugn försedd med en magnetron på 600 W och frekvensen 2450 MHz. Dosen anges i J/g och var uppmätt vid uppvärmning av en vattenlast på 50 ml som tog upp 270 J/g under en exponeringstid på 60 sekunder. De lägre doserna har sannolikt beräknats vara proportionella mot exponeringstiden, d v s att en exponeringstid på 5 sekunder skulle ge 23 J/g, 30 sekunder 135 J/g etc. Men det är inte alls säkert att detta stämmer med de energimängder som verkligen tagits upp.

Den mängd energi som tas upp av en last beror nämligen på många olika faktorer. Exempelvis storlek, form, vattenhalt, dielektriska egenskaper, lastens massa, frekvens, styrka och jämnhet hos fältet påverkar upptagningen av energi. Mätning med kalorimeter är en bättre metod att fastställa mängden energi som absorberats av fröna. Behandlingstiden i ugnen kan dock ge en viss ungefärlig uppfattning om exponeringen (Diprose, 1984).

Tio stycken frön placerades i en petriskål som sedan bestrålades i en kavitetsugn. För varje art gjordes tio stycken upprepningar. Ett frö ansågs ha grott om det hade en 3 mm lång rottillväxt efter 5 dagar. Groningsprocenten beräknades i förhållande till antalet grodda frön i kontrollen.

Det blev stora variationer i resultatet för dom olika arterna, men i stora drag var torra frön mindre mottagliga än de som fått suga åt sig vatten under 4 timmar eller som fått gro under 46 timmar. Variationen mellan de olika arterna minskade också när fröna fått absorbera vatten. Torra frön kunde motstå 6 gånger högre dos än de frön som fått absorbera vatten under 4 timmar. En behandling med 270 J/g av torra jordnötsfrön gav 84%-ig groning, medan frön som absorberat vatten

under fyra timmar och behandlats med en dos på 45 J/g inte grodde alls. Det var inga av de frön som fått gro under 46 timmar och behandlats med 45 J/g som överlevde behandlingen.

De andra åtta arterna visade liknande resultat förutom att de frön som fått gro under 46 timmar var mindre mottagliga än de som absorberat vatten under 4 timmar. Vilket kan tyda på att det inte enbart är vattenhalten som påverkar känsligheten mot bestrålning för de olika arterna.

Man gjorde också experiment med kombinationer av torra frön och frön som fått suga upp vatten under 4 timmar i våt respektive torr sand. Sandens vattenhalt visade sig ha mindre betydelse för effekten av behandlingen än frönas egen vattenhalt.

Davis m fl (1973) redovisar fortsatta försök där man studerat effekten av bestrålningen som en funktion av frönas vikt, volym, densitet, vattenhalt, specifikt värme och kemiska innehåll. Samma arter användes som i den tidigare undersökningen, förutom jordnöt (*Arachis hypogaea*), plus några nya arter (*Canavalia ensiformis*), bönor (*Phaseolus linensis* vars. *Henderson bush* och *Fordhook 242*) samt (*Stizolobium deeringianum*).

Det specifika värmets mättes med standardmetoder för kalorimetriska mätningar. Vattenhalten i fröna kan påverka värdena för det specifika värmets; variationen vid dessa mätningar låg mellan 9% och 13%. Författarna antog att långa polymerkedjor eller andra stora molekyler skulle utgöra lämpliga mål för elektromagnetisk strålning. Proteiner, nukleinsyror, fettsyror, stärkelse och socker finns i ganska stor omfattning i växtceller.

Man analyserade innehållet av proteiner etc och fann samband mellan innehållet av föreningar som var lösliga i eter och känsligheten för bestrålning med mikrovågor. Det visade sig också finnas ett samband mellan massan och volymen på fröna och deras känslighet mot mikrovågor. Men det verkade som om densiteten hade liten betydelse. Författarna ansåg sig inte kunna förklara varför stora frön var mer känsliga än mindre som var tätt packade och hade samma totalvikt som de stora fröna.

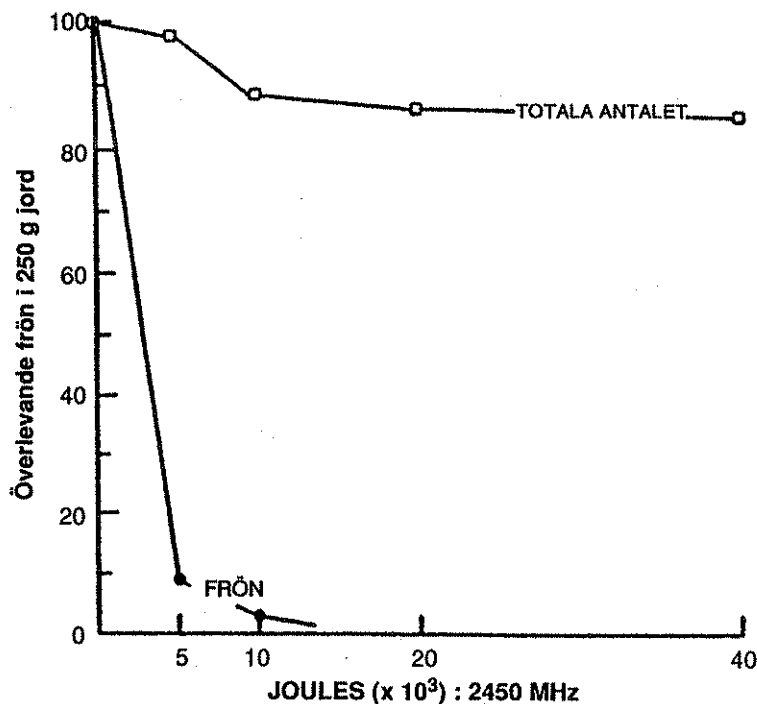
Enligt Davis m fl (1973) så ger UHF-strålning både termiska och atermiska effekter i biologisk vävnad. Men vid de fältstyrkor som användes i försöken var det omöjligt att skilja mellan de termiska och atermiska effekterna. Om sambandet mellan ökande vattenhalt och känslighet för bestrålningen enbart skulle bero på vattnets fysikaliska egenskaper så borde man få linjära samband mellan vattenhalt och effekt av bestrålningen. För två av de fem undersökta arterna verkade detta stämma, medan de övriga inte visade upp ett sådant enkelt samband. Man

menar att detta tyder på att responsen också beror på vävnadens uppbyggnad, och att andra molekyler som tar upp energi kan fungera som isolatorer mot det elektromagnetiska fältet eller att det finns andra okända faktorer som spelar in.

Diprose m fl (1984) ställer sig frågande till resultaten från Davis m fl (1971, 1973) undersökningar. Enligt värden som beräknats utifrån uppgifter från dessa undersökningar skulle det märkliga inträffat, att de frön som fått minsta temperaturhöjningen visade upp den kraftigaste redueringen av grobarheten. Man skulle förvänta sig motsatsen, d v s att största temperaturhöjningen skulle ge minsta grobarhet. Troligen beror de märkliga resultaten på att mängden upptagen energi inte mätts utan beräknats utifrån uppgifter om temperaturhöjning vid uppvärmning av vatten i samma ugn. Man kan inte göra en sådan förenkling, då vatten och frön har helt olika värmningsegenskaper.

Shafer & Smith (1974) behandlade torra frön och frön som fått absorbera vatten i en 1 kW mikrovågsugn (2450 MHz). Det var frön från kolvhirs (foxtail millet) som exponerades. Torra frön hade ett LD₅₀-värde på över 30 minuters exponering. Frön som fått absorbera vatten under 4 timmar och sedan torkats av hade ett LD₅₀-värde på ca 35 sekunders exponering. Frön som absorberat vatten under 16 timmar hade LD₅₀-värde på 25 sekunders exponering. Temperaturen mättes på frön efter exponering motsvarande LD₅₀-värdet, och temperaturen var ca 45 °C. Frön som istället fick ligga i varmt vatten hade också sitt LD₅₀-värde vid 45 °C. Författarna drog därför slutsatsen att man inte kunde påvisa någon atermisk effekt.

Vela m fl (1974) genomförde både laboratorie- och fältförsök. De studerade effekten av mikrovågsbehandling på mikroorganismer och ogräsfrön. I laboratorieundersökningarna användes en kavitetsugn med ca 1 kW effekt och frekvensen 2450 MHz. I ugnen fanns en roterande platta som proverna placerades på. Alla jordproverna vägde ca 250 g. Det var jordar från 6 olika platser i södra USA som användes. Jorden sållades och placerades i glasbägare. Behandling under olika långa tidsperioder gjordes. Det saknas uppgift om vilka ogräsarter som behandlades; det var de ogräsfrön som råkade finnas i jordproven.



Figur 7. Jämförelse mellan effekten av mikrovågsbehandling på ogräsfrön och totala antalet mikroorganismer i laboratorium (efter Vela, 1974).

Den lägsta dos som användes var 5 000 J per 250 g jord. Vid denna dos uppnåddes en effekt på ca 90%, d v s att 90% av de frön som fanns i jorden dödades. Med samma dos uppnåddes en effekt på några få procents reduktion av mikroorganismerna. Det krävs alltså betydligt högre doser för att bekämpa mikroorganismer än ogräsfrön (se fig 7).

Rice & Putnam (1977) undersökte effekten av mikrovågsstrålning på frön från 6 olika arter; svinamarant (*Amaranthus retroflexus*), portlak (*Portulaca oleracea*), humlelucern (*Medicago lupulina*), blodhirs (*Digitaria sanguinalis*), hönshirs (*Echinochloa crus-galli*) och kolvhirs (*Setaria italica*). Proverna placerades i kvartsbehållare i en vågledare. Proverna utsattes för bestrålning med 2450 MHz, och effekten kunde varieras mellan 0.1 och 1.5 kW. Absorptionen av energi mättes med kalorimeter direkt efter behandlingen. Värdena för att uppnå en 50%-ig reduktion av grobarheten varierade mellan 88 J/cm² för blodhirs och 183 J/cm² för humlelucern. Frön av tre arter fick absorbera vatten under 24 timmar före bestrålningen. En 50%-ig reduktion av grobarheten uppnåddes då vid lägre energinivåer (se tabell 1).

Exponering under en mycket kort tid visade sig i något fall kunna stimulera groningen. Det var för blodhirs som groningen ökade till 180% efter en exponering på 10 till 15 sekunder. (Groningsprocenten hos obehandlade frön sattes till 100%.)

Dessa frön har hårda skal och groningsstimuleringen uppstod enbart då skalet tagits bort efter behandlingen. Grobarheten för obehandlade frön av blodhirs hade endast en grobarhet på 2% innan fröskalen tagits bort.

Tabell 1. Energimängd för att uppnå LD50-värden för torkade frön respektive frön som absorberat vatten (efter Rice & Putnam, 1977).

Arter	Dos för att uppnå LD50-värde (J/cm ²)	
	Torra fröer	Fröer med högre vattenhalt
humlelucern <i>Medicago lupulina</i>	183	161
portlak <i>Portulaca oleracea</i>	139	80
hönshirs <i>Echinochloa crus-galli</i>	160	117

I fortsatta studier blandades frön med tre olika jordtyper. Resultatet varierade beroende av arter, jordtyp, temperatur och vattenhalt i jorden. Men generellt sett krävdes kortare behandlingstid i jord med högre vattenhalt för att minska groningen i motsvarande grad. Om strålningsenergin och exponeringstiden varierades så att produkten av intensitet och tid hölls konstant, så visade det sig att den högre effektnivån (1.5 kW) var betydligt mer effektiv än behandling med lägre nivå under en längre tid.

Att det krävdes mindre energi för att skada ogräsfrön i en jord med högre vattenhalt beror troligen på en större temperaturhöjning. Upphettning av jorden är generellt beroende av vattenhalten. Frön som behandlades i en lerjord var känsligare än frön som behandlats i sandjord. Det fanns också skillnader mellan de olika jordarna. Sandjordar tar inte upp energi från mikrovågsstrålning så lätt, framför allt på grund av lägre fältkapacitet och att de innehåller mycket kiselföreningar.

Diprose m fl (1984) kommenterar den aktuella försöksuppställningen. Med en skarp krök i vågledaren och vattenlastens placering finns det risk för att vågorna reflekteras och att det blir ett stående vågmönster i vågledaren. Placeringen av provbehållaren orsakar troligen också reflexion av en del av vågorna. Man påpekar vidare att det är viktigt att man placerar provbehållaren exakt rätt när det finns stående vågor i vågledaren. Detta för att det skall vara möjligt att beräkna mängden energi som absorberas av provet som härrör från variationer i det elektriska fältets intensitet. Enligt Rice & Putnam (1977) var dock den uppmätta reflekterade strålningen minimal.

Diprose m fl (1984) kommenterar vidare att det var klokt att välja kalorimetrisk mätning av energiupptagningen i lasten. Dock borde man valt att mäta i enheten joule eller joule per gram. Rice & Putnam har istället angivit dessa värden i J/cm^2 , men det finns inte några uppgifter om hur dessa värden är framtagna eller vilken yta detta avser.

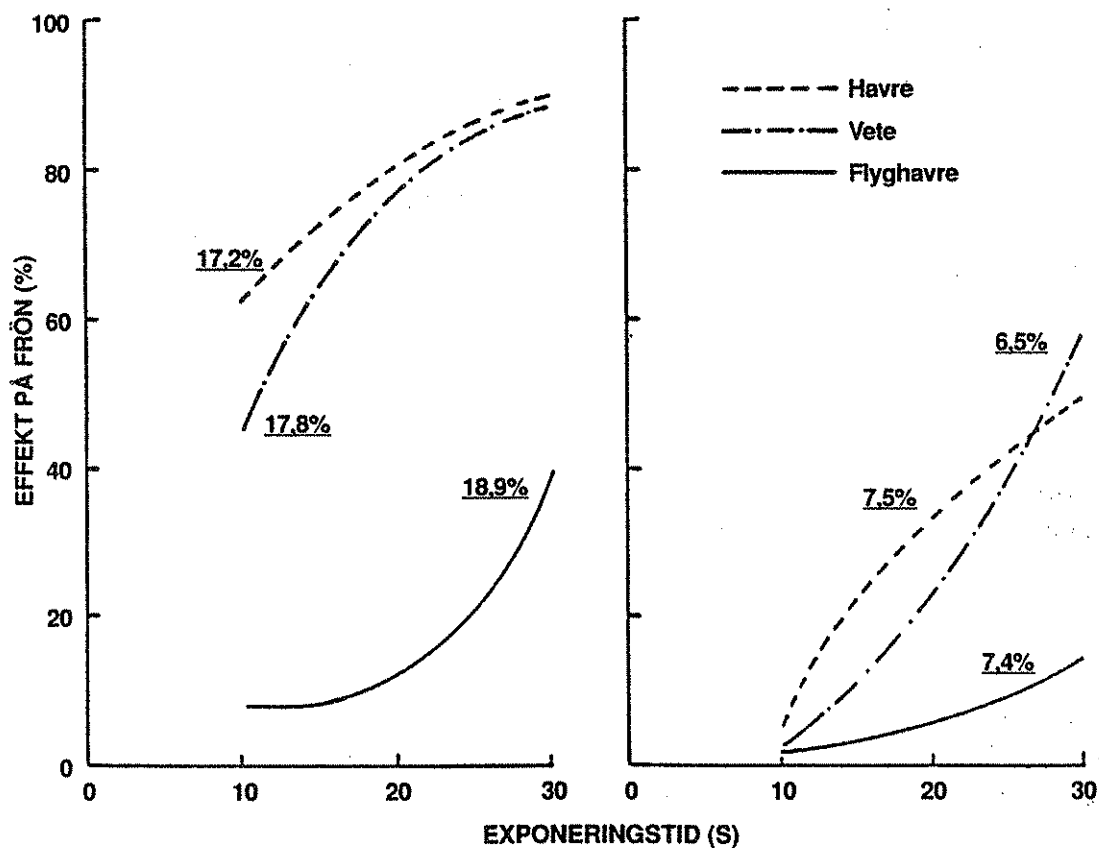
Rice & Putnam (1977) har alltså kommit fram till att det ur energisynpunkt är bättre att ha ett aggregat med hög effekt så att exponeringstiden kan hållas kort, än ett aggregat med lägre effekt där exponeringstiden blir betydligt längre för att uppnå samma behandlingsresultat. Det totala energibehovet kan minskas genom att vattenhalten i fröna och jorden ökas, genom att använda starkare elektromagnetiska fält och genom att behandlingen genomförs då jord- och frötemperaturen är relativt hög. Störst mängd energi krävs för behandling av torra frön i en torr sandjord. Där det är möjligt att istället bekämpa ogräsen efter uppkomst finns möjlighet att spara mycket energi, eftersom plantor är betydligt mer känsliga än frön.

Bhartia m fl (1977) exponerade olika sädesslag och oljeväxtfrön, bl a foderraps (*Brassica napus*), lin (*Linum usitatissimum*) och flyghavre (*Avena fatua*) under 360 sekunder med elektromagnetisk stålning med frekvensen 2450 MHz. Foderraps påverkades obetydligt av behandlingen. För lin och flyghavre reducerades groningen däremot till 15% respektive 5% då den kontrollerades 96 timmar efter bestrålningen. För kontrollerna var siffrorna 88% respektive 50%. Författarna föreslår att skillnaden i känslighet för mikrovågor skulle kunna utnyttjas för utsädesbehandling då frön från besvärliga ogräsplantor är känsligare för mikrovågsstålning än utsädet.

Diprose m fl (1978) föreslog att flyghavre skulle kunna bekämpas selektivt i spannmålsgrödor. De rapporterade en minskning av groningen i flyghavre från 60% till 30% efter exponering under 30 sekunder med 2450 MHz då de grott i torv, och en minskning från 20% till 15% när de exponerats och fått gro på fuktigt filterpapper i petriskålar vid 25 °C. Kavitetsugnen hade 500 W effekt, vilket var tillräckligt för att förånga $5 \text{ J}/\text{cm}^3 \text{ s}$ i en 40 ml vattenlast. Efter försök

(Diprose m fl, 1984) med frön från flyghavre från olika källor (platser) visade det sig tyvärr att det inte var möjligt att upprepa försöken med samma resultat. Man fick variationer från 0% till 60%. Vid de låga värdena kan man snarare säga att frövilan förstärktes än att fröna skadades.

Lal & Reed (1980) exponerade frön från flyghavre (*Avena fatua*, *var montana*) för nivåer på 0.1-1 kW med 2450 MHz-strålning. Fröna lades i en provskål av glas som placerades i en vågledare. I slutet av vågledaren fanns en vattenlast som kunde ta upp mikrovågor för att undvika reflektion. Bäst resultat uppnåddes vid exponering av flyghavre med en vattenhalt på 26.3% i fröna. Vid exponering under 30 sekunder med en effekt på 1 kW förstördes 50% av dessa frön. För frön med vattenhalt på 18.9% dog 38% av fröna, och med en vattenhalt på 7.4% dog 14% av flyghavren. Vattenhalten har alltså en stor betydelse för resultatet (se figur 8).



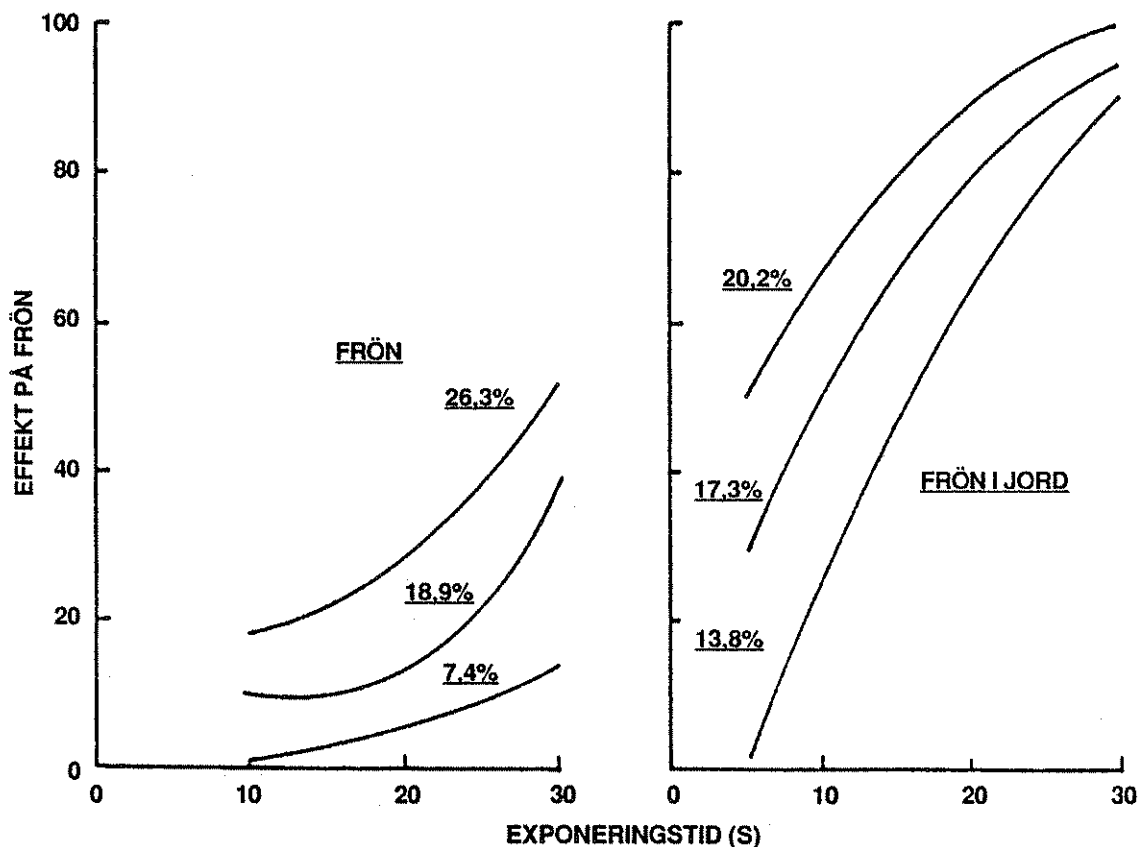
Figur 8. Jämförelse mellan behandlingseffekter på havre, vete och flyghavre vid olika vattenhalter (1 kW, 2450 MHz)(Lal & Reed, 1980).

I samma undersökning behandlades frön som förvarats i jord under 72 timmar vid 1 °C före exponeringen. Exponeringen gjordes då de fortfarande befann sig i jorden, och det visade sig att de var mer mottagliga. Vid vattenhalter på 20.2%, 17.3% och 13.8% dödades 100%, 95% respektive 90% av plantorna (exponering

30 kW). Den stora skillnaden mellan resultaten vid exponering av fröna i jord jämfört med ogräsfrön utan jord är mycket intressant (se figur 9). Flertalet experiment är genomförda i laboratoriemiljö utan jord. Det är alltså möjligt att resultaten skulle ha blivit bättre om fröna blandats i jord, en försöksupställning som mer liknar fältförhållanden.

Författarna tror att den förbättrade effekten vid behandling i jord kan bero på att temperaturen höjs mer då det finns en större mängd vattenmolekyler och större total massa som kan ta upp energin. Jorden omkring fröet blir kraftigt uppvärmd och värmen leds vidare till fröet så att frötemperaturen och därmed skadorna ökar.

Andra experiment som genomfördes av Lal & Reed (1980) visade att havre (Harman oats) och vete (Cypress wheat) var betydligt känsligare än flyghavre för exponering med 2450 MHz och effekt på 1 kW. Detta gällde både för låga och höga vattenhalter.



Figur 9. Jämförelse mellan behandlingseffekter på frön från flyghavre med och utan jord (1kW, 2450 MHz) (Lal & Reed, 1980).

Om man utgår ifrån siffrorna från denna undersökning kan man snabbt räkna ut att det skulle krävas ett aggregat med mycket stor effekt för fältmässig bekämpning av flyghavre. Dessutom skulle framföringshastigheten bli mycket liten. Som exempel nämns att med ett 30 kW aggregat, och med en exponeringstid på 1 sekund skulle man kunna behandla ca 18.2 m² per timme. Framföringshastigheten skulle vara ca 196.7 m/h. Som jämförelse nämns att Menges & Wayland (1974) använde ett aggregat på 6 kW och en maximal hastighet på 38.4 m/h. Lal & Reed (1980) drar slutsatsen att det skulle krävas alltför stora och dyra aggregat, att driftskostnaderna skulle bli höga och att effekten på flyghavren troligen inte skulle bli bättre än 80-90%.

Bigu-del-Blanco m fl (1977) exponerade groddplantor av majs (*Zea mays*, var *Golden Bantam*) för strålning med frekvensen 9000 MHz. Groddplantorna var 48 timmar gamla och groddarna hade precis brutit genom skalet, då de placerades i plastpåsar och behandlades med låg dos av mikrovågsstrålning under 22-24 timmar. Exponeringen låg på mellan 10 och 30 mW/cm² vid exponering utan plantor i ugnen. Efter behandlingen blev bestrålade delar uttorkade, fick en grovkornig struktur och tillväxten avstannade. De plantor som använts som kontroll förblev friska och hade betydligt mindre vätskeförlust än de behandlade plantorna. Skillnaden i tillväxt var också stor från början. Denna effekt försvann efter några veckor. Författarna drog slutsatsen att den långa exponeringstiden med 9000 MHz mikrovågsstrålning t o m vid låg effekt var tillräcklig för att torka ut de små plantorna så att utvecklingen hämmas.

Crawford (1977) undersökte den fytotoxiska effekten på frön av klöver (två var. av *Trifolium repens*, en var. av *Trifolium pratense*) och lucern (*Medicago sativa* var. *Eynsford*) efter bestrålning med 2450 MHz. Fröna exponerades i en mikrovågsgugn med effekt på 1.2 kW (en vattenlast tog upp 690 W) Exponeringstiderna låg på 5-45 sekunder. Efter exponering under 15-20 sekunder reducerades groningen hos samtliga prover. Antalet hårda frön minskade vid exponering på mellan 5 och 15 sekunder. För samtliga arter minskade gröningsbenägenheten efter exponering under 20 sekunder, medan en exponering under 30 sekunder orsakade nästan 100%-ig dödlighet.

Höschle m fl (1981) behandlade frön i en kavitetsgugn (600 W, 2450 MHz). Man påvisade skillnader i känslighet hos olika arter. Vete- (*Triticum aestivum*) och majsfrön (*Zea mays*) skadades mer än böna (*Phaseolus vulgaris*), medan raps (*Brassica napus*) och vicker (*Vicia sativa*) knappast blev påverkade alls av den dos som användes (650 W under 60 sekunder). Författarna ger möjliga förklaringar till skillnaderna i känslighet hos de olika fröerna. Det skulle kunna bero på att fröskalens hårdhet har betydelse, och att de olika fröerna har olika höga halter av icke-vattenlösliga substanser.

De konstaterade också att för frön som ligger djupare ner i jorden krävs det högre dos för att slå ut dem. Frön som absorberat vatten var känsligare än frön som var lufttorkade, vilket stämmer överens med andra undersökningar.

Benz mfl (1984) experimenterade med att mikrovågsbehandla jord i en tunnelugn. Det var en 6 kW ugn men tyvärr saknas uppgifter om frekvensområde. Det var 8 kg jord som breddes ut i ett 5 cm tjockt skikt. En behandlingstid på 3-5 minuter krävdes för att döda ogräsfrön, nematoder och skadliga mikroorganismer. Mellan 10 och 20 kg jord per kWh kunde behandlas. Författarna anser därför att en kommersiell anläggning för behandling av t ex växthusjord skulle vara möjlig ur ekonomisk synpunkt.

Höschle (1984) redovisar resultat av behandling av rotdelar från rotogräs (2450 MHz). Det var kvickrot (*Agropyron repens*) och åkertistel (*Cirsium arvense*) som behandlades. Försöken visade att behandlingstidpunkten har stor betydelse, eftersom det är svårt att komma åt de underjordiska delarna. Försöken med frilagda rötter visade att de var lika känsliga för mikrovågsbehandling som ovanjordiska växtdelar. Detta beror på den höga vattenhalten. Det kan tilläggas att det frekvensområde som användes i försöken (2450 MHz) inte har speciellt effektiv inträngning.

Moosmann & Koch (1988) redovisar försök som genomfördes med ogräsfrön med och utan jord. Man använde en 0.65 kW mikrovågsugn (2450 MHz). När frön behandlades i 5 cm jord visade det sig att det krävdes 97.5 kJ/kg jord för att uppnå en 100%-ig effekt, d v s att inga frön grodde. Vid denna behandling ökade jordtemperaturen till 75-85 °C. Man testade också en prototyp av en tunnelugn, men det krävdes högre doser för att uppnå samma resultat som för kavitetsugnen. Energiöverföringen var alltså mindre effektiv.

I undersökningen behandlades torra frön, frön som fått absorbera vatten, frön som grott och växande plantor. Det visade sig att växande plantor är betydligt mer känsliga än frön. Det räckte med en dos på 0.2 kJ/cm² för att döda växande plantor av vitsenap (*Sinapis alba*). Det krävdes 1.2 kJ/cm² för att slå ut frön som absorberat vatten och frön som grott. För att avdöda torra frön krävdes 25% högre dos.

Arlt & Blumrich (1991) redovisar försöksresultat från experiment där frön från 9 ogräsarter fick absorbera vatten under 24 timmar och därefter behandlades i en mikrovågsugn (2 kW vid frekvensen 2375 MHz). Dessa frön behandlades under upp till 240 sekunder. Man gjorde även försök med frön som placerats 1 eller 5 cm ner i jord. De frön som placerats i jord behandlades under 1 minut och fick ligga kvar i jorden under ytterligare 15 minuter. Direkt efter behandlingen var jordtemperaturen 58 °C på 1 cm djup och 69 °C på 5 cm djup.

De arter som undersöktes var amarant (*Amaranthus retroflexus*), lomme (*Capsella bursa-pastoris*), blåklint (*Centaurea cyanus*), svinmålla (*Chenopodium album*), vallmo (*Papaver rhoeas*), åkerspergel (*Spergula arvensis*), våtarv (*Stellaria media*), penningört (*Thlaspi arvense*) och åkerviol (*Viola arvensis*).

Det visade sig att frön från de olika arterna hade olika känslighet. Arterna delades in i olika grupper enligt tabell 2.

Tabell 2. Känslighet hos olika frön för mikrovågsbehandling. 1 = mycket känslig, 2 = känslig, 3 = måttligt känslig (Arlt & Blumrich, 1991).

Arter	Känslighet för mikrovågor	
	Utan jord	Med jord
amarant <i>Amaranthus retroflexus</i>	3	3
lomme <i>Capsella bursa-pastoris</i>	2	3
blåklint <i>Centaurea cyanus</i>	1	1
svinmålla <i>Chenopodium album</i>	3	3
vallmo <i>Papaver rhoeas</i>	1	3
åkerspergel <i>Spergula arvensis</i>	2	2
våtarv <i>Stellaria media</i>	2	3
penningört <i>Thlaspi arvense</i>	1	1
åkerviol <i>Viola arvensis</i>	1-2	1

Att frön i jord var mindre känsliga berodde troligen på att temperaturhöjningen inte var stor efter en minuts behandling. Efter behandling under 2 minuter, d v s en dos på 180-200 J/cm², uppnådde man en 100%-ig effekt.

Kunisch m fl (1992) gjorde laborieförsök med ogräsfrön. För att kontrollera effekten på ogräsfrön, gjordes ett försök där 50 behandlade frön placerades på filterpapper i petriskålar. Efter några få dagar räknades groddplantorna och skalen togs bort. De frön som fortfarande inte grott efter 28 dagar testades för att kontrollera om det fanns liv i dem. Behandlingarna gjordes med en 6 kW kavitetsugn. Tyvärr finns inte resultaten redovisade i artikeln.

Man studerade grobarheten hos frön som befunnit sig på plantan vid behandlingen med mikrovågor. Det var mogna frön från svinmålla (*Chenopodium album*), hönshirs (*Echinochloa crus-galli*) och vitgröe (*Poa annua*) som befann sig på plantorna vid behandlingen och därefter skördats. En behandlingstid på 16 sekunder, och för vitgröe upp till 48 sekunder gav ingen effekt på grobarheten hos fröna. Frön som fått mogna efter behandlingen (vitgröe), hade en grobarhet på 76% efter 32 sekunders behandling och 12% efter behandling under 42 sekunder.

Laborieförsök med behandling av ogräsplantor - litteraturstudie

Davies m fl (1971) gjorde inte bara försök med frön utan också med växande plantor. Plantor som var 14 dagar gamla exponerades för mikrovågor (2450 MHz) med doser som låg mellan 9 och 36 J/g. Experimenten upprepades tre gånger och effekten graderades 5 dagar efter behandlingen. Effekten varierade mycket för olika arter. Efter behandling med 23 J/g fick man skador på mellan 0 och 100% på vävnaden. Arter som var relativt motståndskraftiga var sorgum, "jungle rice", gurka, senap och vete. Bomull var väldigt känsligt även vid den lägsta dosen.

Inverkan av plantålder studerades när det gäller två arter; bönor (*Phaseolus vulgaris*) och *Prosopis juliflora*. Man exponerade bönplantor som var 8 respektive 28 dagar gamla och *Prosopis*-plantor som var 8, 45 och 360 dagar gamla för doser på mellan 4.7 och 540 J/g. Gradering av skadorna gjordes efter 5 och 20 dagar. Experimenten upprepades tre gånger. Plantans ålder hade liten betydelse för bönplantans känslighet, men för *Prosopis juliflora* ökade motståndskraften med åldern. Efter 8 dagar var bönplantorna många gånger känsligare än *Prosopis juliflora*.

Champ m fl (1972) gjorde försök med att bekämpa vattenväxter med mikrovågor (2450 MHz). Det visade sig att plantor av olika arter var olika känsliga för behandlingen. I laborieförsöken placerades plantor i petriskålar och behandlades i en 600 W kavitetsugn. Dosen är angiven i J/ml som absorberats av en vattenlast tidigare. Olika varieteter av växten andmat behandlades. LD₅₀-värdet låg på

16.7 J/ml för arten *Wolffia punctata*. I fältförsök behandlades andmat (*Spirodela* sp), *Wolffia punctata* och *Wolffia columbiana*. Undersökningen visade att högre doser krävs under realistiska förhållanden då det finns annan materia som också kan ta upp energi.

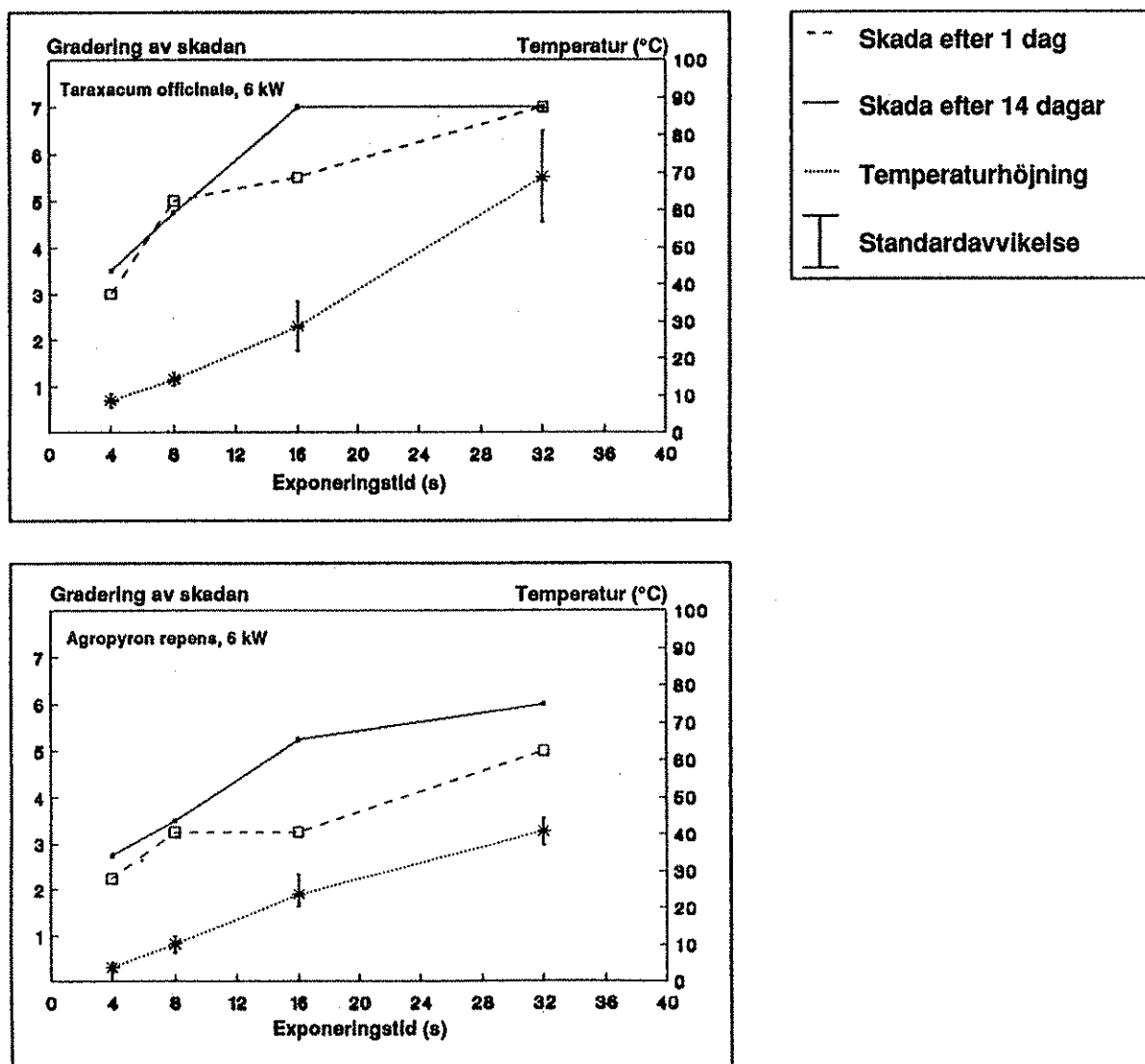
Författarna drar slutsatsen att det skulle vara möjligt att använda metoden i praktiken. Experimenten visar att man kan bekämpa flytande växter, men att det krävs ytterligare undersökningar för att ta reda på om det skulle vara möjligt att bekämpa annan vattenvegetation.

För att undersöka möjligheten att använda mikrovågor mot ogräs på banvallar genomförde Kunisch m fl (1992) undersökningar av effekten på växande plantor efter bestrålning. Man odlade testplantor i lerkrukor. Plantantalet reglerades genom att ett bestämt antal ogräsfrön såddes i krukorna. Av vitsenap (*Sinapis alba*) och vete (*Triticum aestivum*) såddes 25 frön/kruka. På liknande sätt såddes andra arter också. För en del arter grävdes plantor upp och planterades i lagom stora krukor. Krukorna vägdes före och efter behandlingen, och jordtemperaturen mättes också.

Bedömning av plantornas kondition gjordes 1, 3, 7 och 14 dagar efter behandlingen. Då användes följande skala:

1. Samtliga plantor är friska
2. 10% av plantorna skadade
3. Ca 10-40% av plantorna skadade
4. Ca 40-60% av plantorna skadade
5. Ca 60-90% av plantorna skadade
6. Över 90% av plantorna skadade
7. Samtliga plantor döda

Mikrovågsugnen hade en effekt på 6 kW (2450 MHz). Den bestod av en reglerbar magnetron från vilken strålningen leddes in i en kavitet där den spreds. Den reflekterade strålningen mättes, så att absorptionen kunde beräknas och dosen justeras. Samtliga plantor av fliknäva (*Geranium dissectum*) och vitgröe (*Poa annua*) dödades av en behandling under 16 sekunder och avläsning 14 dagar efter behandlingen. Man hade motsvarande effekt på vitsenap (*Sinapis alba*), trädgårdsveronika (*Veronica persica*), rödmire (*Anagallis arvensis*), en kamomill-art (*Matricaria chamomilla*), svinmålla (*Chenopodium album*), snärjmåra (*Galium aparine*), rödklöver (*Trifolium pratense*), vete (*Triticum aestivum*), hönshirs (*Echinochloa crus-galli*) och engelskt rajgräs (*Lolium perenne*).



Figur 10. Effekten av olika behandlingstider på maskros (*Taraxacum officinale*) och kvickrot (*Agropyron repens*) plus temperaturförändring i jorden (2450 MHz, 6 kW) (Kunisch m fl, 1992).

Skadorna visade sig redan en dag efter behandlingen på vissa arter (t ex rödmire och rödklöver), medan andra arter visade skador först efter 1-2 veckor (t ex vitgröe, snärjmåra). För kvickrot krävdes längre behandlingstider (32 sekunder) än för ettåriga arter. För maskros räckte det med 16 sekunder (fig 10). Den uppnådda temperaturhöjningen och temperaturförloppet var olika för olika arter.

Tabell 3. Behandlingstid med mikrovågor (2450 MHz, 6 kW) för att uppnå behandlingseffekt på 40-60% respektive 100 % (Kunisch mfl, 1992).

Arter	Effekt 40-60%	Effekt 100%
kvickrot <i>Agropyron repens</i>	11,5	38,1
maskros <i>Taraxacum officinale</i>	9,5	32,0
groblad <i>Plantago major</i>	14,6	30,1
rödklöver <i>Trifolium pratense</i>	10,3	29,8
vitgröe <i>Poa annua</i>	5,9	28,2
vete (före blomning) <i>Triticum aestivum</i>	-	28,0
vitsenap (före blom) <i>Sinapis alba</i>	-	26,5
vete (före mognad) <i>Triticum aestivum</i>	-	25,0
snärjmåra <i>Galium aparine</i>	-	25,0
lönner <i>Acer sp</i>	-	24,0
hönshirs <i>Echinochloa crus-galli</i>	3,7	19,2
vete (småplantstadium) <i>Triticum aestivum</i>	5,2	18,3
rödmire <i>Anagallis arvensis</i>	2,9	15,5
kamomill-art <i>Matricaria chamomilla</i>	5,3	14,4
svinmålla <i>Chenopodium album</i>	-	13,3
engelskt rajgräs <i>Lolium perenne</i>	5,2	12,1
vitsenap (småplantstadium) <i>Sinapis alba</i>	1,9	9,1
trädgårdsveronika <i>Veronica persica</i>	2,5	8,8
fliknäva <i>Geranium dissectum</i>	-	<4,0

I tabell 3 visas hur långa behandlingstider som krävdes för att uppnå överlevnadsgrad 4 (ca 40-60% av plantorna döda) respektive 7 (samtliga plantor döda). Undersökningar med plantor i olika utvecklingsstadier hos vitsenap och vete visade att effekten av mikrovågsbehandling efter blomning var bättre på äldre än på yngre plantor även om symptomen uppträder senare.

Försöken visade att det i princip är möjligt att döda plantor, även sådana som förökar sig vegetativt med underjordiska utlöpare, i en sluten applikator. Vid praktisk tillämpning av metoden vid ogräsbekämpning på banvallar skulle det krävas en annan typ av aggregat, så det är inte möjligt att direkt överföra resultaten till en fältsituation.

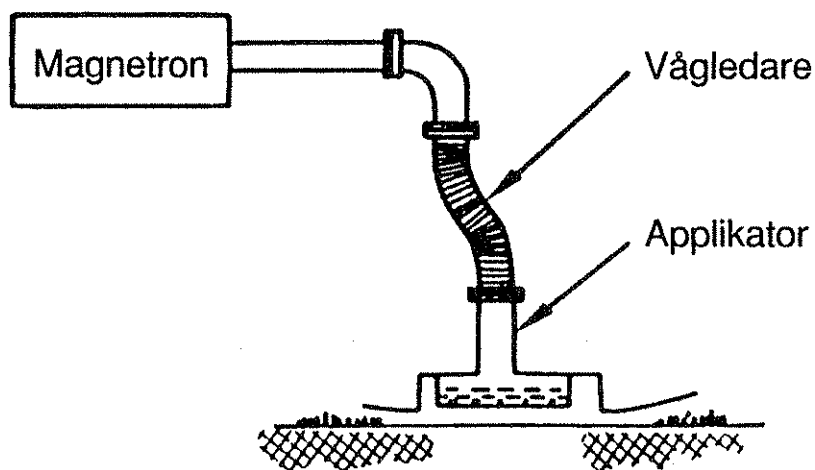
Skillnader i känslighet för mikrovågsbestrålning för olika arter kan bero på skillnader i dielektriska egenskaper. Plantornas geometri och bladmassans storlek har betydelse för resultatet. Vatten- och salthalt spelar också in.

Det verkade inte ha någon betydelse om energin tillförs genom hög effekt under kort tid eller lägre effekt med längre exponeringstid. Resultaten visar att växter som förökar sig vegetativt kräver längst behandlingstid. Det verkar som om det finns ett samband mellan marktemperatur och överlevnaden hos de underjordiska delarna. Det krävs höga marktemperaturer för att döda plantorna. Det är dock inte uteslutet att rötter och andra underjordiska plantdelar kan värmas selektivt i jorden. Där har de aktuella förhållandena, såsom vattenhalt i jorden, rottdjup etc, stor betydelse. En selektiv uppvärmning fungerar endast då intensiteten är hög och behandlingstiden kort. Annars skulle värmeledning mellan det uppvärmda plantmaterialet och den relativt kalla marken snart ge en temperaturutjämning. Om hela jordlagret skulle behöva värmas upp till dödliga temperaturer, så skulle det krävas stora mängder energi. En användning i full skala verkar då utesluten menar Kunisch m fl (1992).

Fältförsök med behandling av ogräsfrön

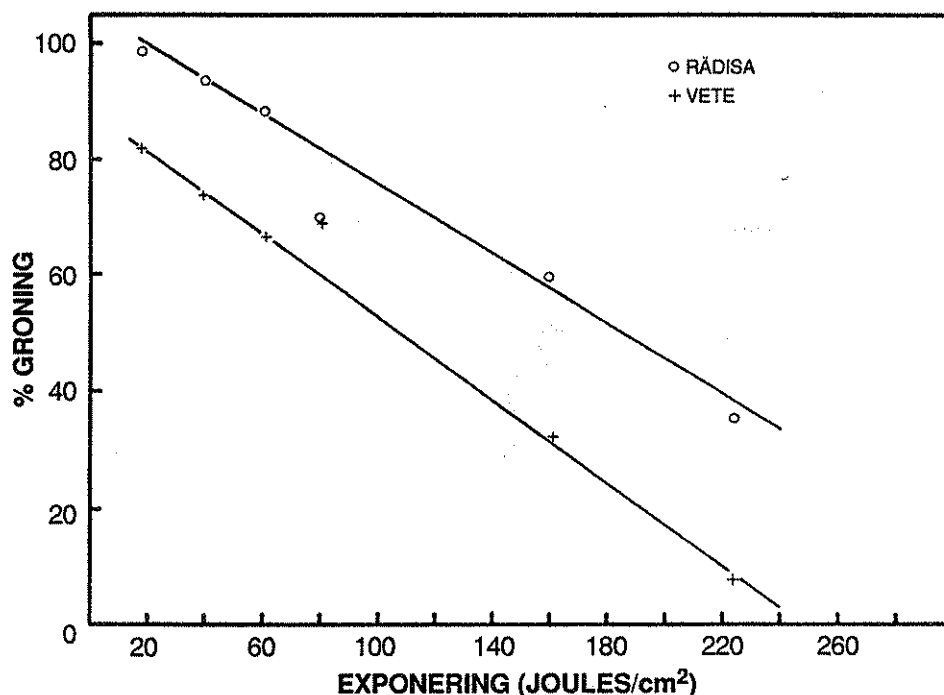
Wayland m fl (1973) grävde ner vetekorn (*Triticum aestivum*) och rädisfrön (*Raphanus sativus*) i små papperskuvert 2.5 cm ner i jorden i en lerig mojord med vattenhalt på 6.8%. Försöken gjordes inte på ett fält, utan i en stor behållare som fyllts med jord. Fröna hade fått absorbera vatten under 10 timmar innan de grävdes ner. Ett mikrovågsaggregat på 1500 W användes. Aggregatet genererade mikrovågor med frekvensen 2450 MHz och det hade en kvadratisk applikator 10.2 x 10.2 cm, försedd med keramiska plattor (figur 11). Efter behandlingen fick fröna gro i petriskålar. För att uppnå 50-procentig ogräseffekt krävdes 100 J/cm² för vete och 180 J/cm² för rädisa. Efter en behandling med 210 J/cm² reducerades

groningen till 15% för vete och 40% för rädisor. Skillnaden i känslighet mellan vete och rädisa var väntad eftersom rädisfrön väger ungefär hälften så mycket som vetekärnor.



Figur 11. Applikator som användes i försöket (efter Wayland m fl, 1973).

I speciella undersökningar användes en konstant dos på 210 J/cm^2 för exponering av fröprover men med olika effektnivåer. Vid behandling av vete hade det inte någon betydelse om man exponerade kärnorna med effekt på 100 W under lång tid eller med 1200 W under kort tid. Andelen frön som dödades var ungefär 60% i båda fallen. Men när det gällde rädisfrön så dödades 35% vid 100 W och 45% vid 1200 W. Jordtemperaturen kom upp till 60 °C vid 100 W och 50 °C vid 1200 W. (Se figur 12).



Figur 12. Effekten av olika doser av mikrovågsstrålning (2450 MHz) på vete- och rädisfrön på ett djup av 2.5 cm i lerig mjord (Wayland m fl, 1973).

Enligt författarna kan man sluta sig till att applikatorn troligen inte var speciellt effektiv när det gäller att överföra mikrovågorna till fröna. Mängden energi som krävdes var ungefär dubbelt så stor som den energi som krävdes för att uppnå samma resultat i en kavitetsugn. Men det är inte möjligt att göra en direkt jämförelse mellan dessa experiment, då fröna i kavitetsugnen inte var täckta med jord.

Viktiga slutsatser var att en ökad effekt åtminstone kunde kompensera förkortad exponeringstid, och för en del arter uppnår man bättre bekämpningseffekt genom att öka aggregatets effekt än att förlänga exponeringstiden. Troligen skulle frön kunna bli skadade av kortvarig exponering med höga effektnivåer (totalt kW). Detta är nödvändigt för en kommersiell tillämpning av metoden. Man kan också notera att de mindre rädisfröna var mer känsliga för behandling vid högre effektnivåer.

Wayland m fl (1975) fortsatte sina fältexperiment med fyra 1.5 kW (2450 MHz) aggregat monterade på en vagn. Den var försedd med en applikator som var 20.4 x 20.4 cm, och öppningen var täckt av en keramisk platta. Experiment genomfördes på tre olika platser i Florida och Texas. Det var en sandjord med vattenhalt på 10% och temperatur 23 °C, en sandig lera med 12% vattenhalt och 25 °C samt en annan lerig mjord med vattenhalt på 20% och med 20 °C i jordtemperatur (samma jord som användes i försöken som redovisats av Wayland m fl (1973). Frön av vete (*Triticum aestivum*), korn (*Hordeum vulgare*), havre (*Avena byzantina*), en

kålväxt (*Brassica kirta*), rädisa (*Raphanus sativus*), foderraps (*Brassica napus*), majs (*Zea majs*) och sorgum (*Sorgum bicolor*). Vagnen drogs över fältet för behandlingar på mellan 35 och 325 J/cm². För att uppnå acceptabel effekt, d v s minst 80%, både på gräs och örtartade plantor krävdes minst 183 J/cm².

Efter uppkomst-behandlingar gjordes också. Småplantor av *Echinochloa frumentacea*, en senaps-art (*Sisymbrium irio*), solros (*Helianthus annuus*), törel (*Euphorbia glyptosperma*) och svinamarant (*Amaranthus retroflexus*) behandlades 27 dagar efter sådd. Doser på 77, 154 och 309 J/cm² och effekten 4.4 kW användes. Åtta dagar efter behandling med 77 J/cm² var effekten hundra procentig för solros, törel och svinamarant. För *Echinochloa frumentacea* var effekten 73% och senap 87%. För att uppnå 100-procentig effekt på de två sistnämnda arterna krävdes 309 J/cm².

På en annan försöksplats fanns ett naturligt bestånd av *Oenothera laciniata* (besläktad med nattljus) som var mellan 5 och 15 cm höga. En dos på 70 J/cm² dödade 99% av plantorna. I växthusförsök konstaterade man att större plantor (15 dagar) var mer känsliga än mindre (8 dagar) när det gällde blomman för dagen (*Ipomoea* sp), en hirs-art (*Panicum texanum*) och hönshirs (*Echinochloa crus-galli*). Att de större plantorna var känsligare beror troligen på den större bladytan.

Det visade sig att det var stora variationer på effekten av mikrovågor på begrävda frön mellan de olika försöksplatserna. Det var också tydligt att bekämpningseffekten var bättre på gräsplantor än på gräsfrön vid behandling med 70 J/cm².

För bekämpning av ett rotagräs, en vild sorgum-art (*Sorghum halepense*), krävdes ca tio gånger mer energi än vid behandling av annuella ört- och gräsogräs.

Menges & Wayland (1974) jämförde kemisk bekämpning och bekämpning med mikrovågor i ett par grönsaksgrödor. Bakgrunden var att det fanns problem med herbicider som bröts ner långsamt och därför kunde ge upphov till skador på efterföljande känsliga grödor. Herbicider blandades in i såbädden till ett djup av 3.8 cm, och sedan grävdes ogräsfrön ner i jorden. Det var senap- och solrosfrön som begrävdes 0.3 cm respektive 1 cm ner i bädden. Övriga parceller med ogräsfrön behandlades med mikrovågsbestrålning (2450 MHz) med doser på 45 till 720 J/cm². Fyra timmar efter mikrovågsbehandlingen såddes lök i samtliga parceller. Av herbiciderna var det endast methazole som hade godtagbar effekt mot senap (99%) men löken blev också skadad (85%). Effekten mot solros blev enbart 72%. En annan herbicid som var relativt effektiv mot senap var propachlor som hade 48-procentig effekt mot senap och 20-procentig effekt mot solros. Skadorna på löken blev 30%-iga. Bäst effekt mot solros hade methazole och därefter kom perfluidone som gav 36-procentig effekt men som också orsakade 85-procentiga skador på löken. Med en dos på 360 J/cm² av mikrovågor dödade 94% av senap och

hade 100-procentig effekt mot solros. Man anger att skadorna på löken uppgick till 18%, att jämföra med 12% för de handrensade kontrollparcellerna och 17% för de kontroller som inte bekämpats alls. Det ges ingen förklaring till dessa siffror.

I ett annat försök såddes senap, törel, svinamarant, *Echinochloa frumentacea* och solros både i bevattnade och obevattnade parceller samtliga behandlade med 2450 MHz mikrovågor. I de bevattnade parcellerna såddes ogräsfrön 4 dagar före behandlingen för att de skulle få en chans att suga åt sig vatten. I de obevattnade parcellerna såddes ogräsfröna endast 3 timmar före behandlingen för att undvika att de skulle hinna suga åt sig så mycket vatten. Frön av melon (*Cucumis melo var reticulatus*) såddes med ett djup på 2 cm en dag efter mikrovågsbehandlingen. I de bevattnade parcellerna blev effekten av en dos på 45 J/cm² otillräcklig, men med 90 J/cm² fick man 80-procentig effekt mot alla ogräs förutom portlak (*Portulaka oleracea*), en art som fanns på platsen från början. Effekten mot portlak var endast 50-procentig. Med en dos på 180 J/cm² uppnådde man en bekämpningseffekt på mer än 96% förutom för portlak där effekten var 81%. En minut efter behandlingen var jordtemperaturen 80 °C, och 10 minuter efter var den 44 °C.

I obevattnad jord fick man hundraprocentig ogräseffekt efter behandling med 360 och 720 J/cm² och förutom för portlak så var det lika god effekt av dosen 180 J/cm². Jordtemperaturen uppgick till 103 °C en minut efter behandlingen med 720 J/cm², och efter 150 minuter var den fortfarande så hög som 47 °C. Skörden av melon var högre i parcellerna som behandlats med 180, 360 och 720 J/cm² än för den bekämpade kontrollen. Skördesiffrorna var, nämnt i samma ordning; 150, 120 och 140% för de olika behandlingarna.

Menges & Wayland (1974) redovisar också försök där man odlat lök. Man bredsådde och myllade svinamarant-frön ner till ett djup på 13 cm i lerig mojord. Senap och solros såddes på ett djup av 2.5 cm i bevattnade parceller. Ogräsfrön såddes två dagar före behandlingen i den bevattnade jorden. De bevattnade parcellerna vattnades dagligen fram till behandlingen med mikrovågor. Därefter såddes lök. På frön av senap och solros hade man en effekt på ca 90% med dosen 360 J/cm² både i de bevattnade och obevattnade parcellerna. Efter behandling med 180 J/cm² hade man för senap en effekt i våt och torr jord på 87% respektive 66%. För solros var motsvarande siffror 93% och 68%. Man gjorde bedömningen att frönas absorption av vatten hade större betydelse än jordens vattenhalt.

Trots att man fick bättre effekt i bevattnad än obevattnad jord visade laboratorietester att det blev en mer effektiv nerträngning i jorden om den var torr. Behandlingen med 360 J/cm² hade effekt på svinamarant ner till ett djup på 7.5 cm både i bevattnad och obevattnad jord, och det fanns viss effekt av behandlingen ända ner till 10 cm i jorden. Med en dos på 180 J/cm² var behandlingen effektiv ner till 7.5 cm i den torra och 5 cm i den fuktiga jorden. Vid 90 J/cm² hade man ingen

effekt i den bevattnade jorden, medan frögroningen verkade stimuleras i den torra jorden. Det verkar som om fröets upptagning av vatten har större betydelse än inträngningsdjupet i jorden. Löbskörden verkade öka i de behandlade parcellerna. Vid behandling med 90, 180 och 360 J/cm² fick man skörd på 161, 272 och 233% jämfört med de parceller som inte alls ogräsbekämpats. Vid en jämförelse med handrensade parceller fick man skördar på 83, 137 och 120%. Den skördehöjande effekten av mikrovågsbehandlingen berodde troligen på att behandlingen också tjänade som bekämpningsmetod mot mikroorganismer i jorden som normalt hämmar lökens tillväxt. Laboratorieundersökningar som gjordes senare visade att plantornas höjd och rotlängden ökade om man mikrovågsbehandlat en jord som var smittad med svampen *Pyrenochaeta terrestris*. Minskningen av vattenhalt i det översta jordlagret kan också vara en orsak, eftersom vissa patogena svampar missgynnas av detta.

Whatley m fl (1973) konstaterade att mikrovågorna (2450 MHz) försvagades mer i en lerig mojord med hög vattenhalt (10-13%) än i en jord med lägre vattenhalt (mindre än 0.5%). Därför rekommenderar de att behandlingen bör göras när ytskiktet på jorden är så torrt som möjligt. I en senare artikel, Whatley m fl (1974), påstår författarna att för laboratorieexperiment bör man eftersträva så liten vattenhalt som möjligt i jorden och så hög vattenhalt som möjligt i fröna. För applicering i fält är det gynnsamt med så hög vattenhalt som möjligt i jord och frön. Jordtypen har stor betydelse i laboratorieexperiment där man använder ungstorkad jord, men vid en praktisk tillämpning då jordarna är våta har skillnaden mindre betydelse än frönas vattenhalt.

Hightower m fl (1974) behandlade frön från fyra olika arter; två gräsarter, klöver och rova, med 2450 MHz mikrovågsstrålning. Fröna spreds ut på jorden i lådor och man behandlade med effekter mellan 100 och 750 W under 2-20 minuter. Detta innebar att man behandlade med doser på mellan 50 och 300 J/cm². Det blev liten eller ingen effekt alls på groningen. Det växtslag som blev mest påverkat var rova, där groningen låg på en konstant nivå på 78% upp till en dos på 200 J/cm² men som minskade till 60% vid en dos på 300 J/cm².

Fortsatta försök genomfördes med frön av en svingel-art (*Festuca elatior*) som spreds ut på markytan. Först efter behandling med mycket höga doser fick man något minskad groningen.

Därefter gjorde man en undersökning med frön som fått absorbera vatten under 12 timmar och som sedan spreds på ytan av en fuktig jord. Man beräknade att det krävdes 1500 J/cm² vid 750 W för att uppnå acceptabel effekt på den sandiga lerjorden medan det krävdes 10 500 J/cm² för lerjord. Vid 1200 W krävdes det 1600 J/cm² för båda jordtyperna. Med de uppgifter författarna hade för behandling på en torr jord gjordes en uppskattning av kapaciteten. Man kom fram till att med en

maskin på 2 kW effekt och en applikator med ytan 100 cm^2 skulle körhastigheten skulle bli ca 0.00035 km/h och att det skulle krävas en behandlingstid på 8750 timmar för att behandla en acre, vilket motsvarar 21 620 timmar/hektar. Men man hade samma erfarenheter som andra forskare; att frön med högre vattenhalt är känsligare än torra frön. När fröna hade hög vattenhalt, så hade jordtypen avsevärt mindre betydelse, vilket stämmer överens med de undersökningar som gjorts av Whatley m fl (1974).

Hightower m fl (1974) valde en besvärlig uppläggning av försöken. En svårighet var att man lade fröna på ytan. Utrustningen som användes av Hightower m fl hade en annan utformning än den utrustning som använts av Wayland m fl (1973). Wayland m fl använde en liten kavitetsapplikator som placerades på jordytan. Med denna utrustning hävdade de att 200 J/cm^2 skulle räcka för normal ogräsbekämpning och att 600 J/cm^2 skulle vara nog för att klara av besvärliga ogräs som *Sorghum halepense*. Hightower m fl hävdar att det krävs minst 1600 J/cm^2 med deras experimentutrustning. De använde en laddad vågledare som placerades 2 cm ovanför fröna. Menges & Wayland (1974) mätte jordtemperaturen efter behandlingen då de använde en generator på 1.5 kW. En minut efter behandlingen med 180 J/cm^2 var jordtemperaturen 80°C . Denna värme hjälpte sannolikt till med att skada fröna. Genom att lägga fröna ovanpå jorden gick Hightower m fl miste om den ogräseffekt som beror på jordens förmåga att hålla värmen.

Teoretiska modeller för mikrovågsbehandling av ogräsfrön i jord

Olsen (1975) använde modeller för att teoretiskt beräkna värmningsförloppet och effekten på ogräsfrön i jord. Bakgrunden var att experimentella undersökningar (Wayland m fl, 1973; Hightower m fl, 1974) hade givit helt olika resultat. Enligt Wayland m fl krävdes en dos på $100\text{--}180 \text{ J/cm}^2$ (2450 MHz) för att få god effekt på ogräsfrön som fått absorbera vatten och sedan grävts ner i jord. Hightower m fl genomförde försök på liknande sätt, men kom istället fram till att det krävdes 1600 J/cm^2 för att uppnå samma effekt.

Olsens modell tar inte hänsyn till eventuella atermiska effekter av mikrovågorna, utan betraktar effekten på ogräsfrön som en ren uppvärmningseffekt. Enkelt uttryckt kan man säga att ju större effekt som tas upp av ett material, desto större blir temperaturhöjningen i materialet på en bestämd tid. Ju större temperaturhöjningen blir i fröet, desto större är chansen att fröet dör.

Enligt Olsen kan man förvänta sig att bestrålning med mikrovågsfrekvenser i jord är en ganska ineffektiv metod. Skälet till detta är att förlustfaktorerna för vanligt förekommande jordar och frön som inte absorberat vatten är ganska lika. Frön och jord har alltså liknande värmningsegenskaper. Detta innebär att det inte

finns möjlighet att värma upp bara ogräsfröna, utan att hela jordmassan kring fröet också måste värmas upp. Däremot har frön som absorberat vatten en större förlustfaktor och temperaturen ökar därför snabbare i fröet än i omgivande jord.

Ogräsfrönas volym är avsevärt mycket mindre än jordvolymen. Därför kommer en mycket större del av energin att utvecklas i jorden än i fröna. Mängden energi som absorberas av frön som bestrålsats uppifrån beror inte bara på intensiteten och exponeringstiden. Det beror också på reflexionen mot ytan och fröets geometri.

När en mikrovåg rör sig ner i jorden minskar amplituden efter hand. Detta beror på att energi successivt tas upp av jorden. Detta innebär att ju längre ner i jorden fröet ligger, desto sämre blir effekten av behandlingen.

Temperaturhöjningen i ett frö är beroende av en rad olika faktorer. Den beror på mängden energi som tas upp i fröet, exponeringstiden, värmekapacitiveteten och fröets massa. Temperaturhöjningen beror också på värmeledningen till och från det omgivande mediet.

Både fröets och den omgivande jordens temperatur kommer att öka. Först kommer fröets temperatur öka fortare än den omgivande jordens. Värmeledningseffekten kommer att bli betydande och hastigheten på temperaturhöjningen kommer att närma sig omgivningens. Så småningom kommer temperaturen stabiliseras och det blir en konstant temperaturdifferans mellan dem. Efter att bestrålningen upphört sjunker fröets temperatur till jordtemperaturen. Sedan sjunker både frö- och jordtemperatur sakta. Hur lång tid den förhöjda temperaturen i fröet varar har stor betydelse för den eventuella gröningshämmande effekten.

Jordtypen har stor betydelse för värmeegenskaperna. En mineraljord, t ex sand- eller lerjord, har mycket bättre ledningsförmåga än en organisk jord. Ju bättre ledningsförmåga desto snabbare kyla jorden av. Jordtypen kan alltså ha en stor betydelse för effekten av mikrovågsbehandling av frön i jord.

Den mest effektiva behandlingen av frön som ligger 2.5 cm ner i jorden får man vid användning av mikrovågor av frekvensen 1000 MHz. För frön som inte ligger så djupt nere i jorden är det mera effektivt med mikrovågor med högre frekvens, och för frön som ligger djupare ner fungerar det bättre med lägre frekvenser.

Enligt Olsen (1975) bekräftar modellen Hightowers resultat; att det krävs mer än 865 J/m^2 för att uppnå god effekt mot ogräsfrön som inte absorberat vatten. Men han påpekar också att mängden energi per ytenhet inte är den enda faktorn som påverkar effekten på ogräsfröna. En annan viktig faktor som nämnts tidigare är jordarten.

DISKUSSION

Mikrovågsbehandling är möjlig att använda som ogräsbekämpningsmetod. Detta har konstaterats i en rad försök där man behandlat ogräsfrön, ogräsfrön i jord eller växande plantor. I första hand rör det sig om rena uppvärmningseffekter. Även om det finns arter som är relativt värmetåliga, så är det egentligen bara en fråga om att höja dosen tillräckligt mycket för att slå ut även dessa plantor.

I litteraturen diskuteras också atermiska effekter av mikrovågsbehandling, d v s effekter som inte beror på temperaturhöjningen i fröet eller plantan. Det är svårt att undersöka atermiska effekter eftersom produkten måste kylas kontinuerligt för att förhindra uppvärmning. Vid de doser som krävs för att få god effekt på frön eller plantor blir uppvärmningen så kraftig att de termiska effekterna anses vara helt dominerande.

Det finns ganska många undersökningar gjorda om mikrovågor som metod för ogräsbekämpning. Tyvärr är många av undersökningarna gjorda på ett sätt som kan ifrågasättas. Exempel på detta är att man placerat torra ogräsfrön i en ugn och behandlat med olika doser. Torra frön absorberar inte mikrovågorna, och behandlingseffekten blir givetvis dålig. I vissa försök har man före behandlingen låtit frön absorbera vatten under en viss tid. Tyvärr saknas dock uppgifter om frönas vattenhalt, och det är tveksamt om vattenhalten motsvarar en "trolig" vattenhalt hos frön i jord.

Det som framför allt skiljer mikrovågsvärmning från andra uppvärmningsmetoder är inträngningen. I vanliga fall värms en kropp vid ytan och värmen leds sedan in i kroppen. Mikrovågor tränger istället in i kroppen och uppvärmningen sker inuti den. Vid bekämpning av växande ogräsplantor har man inte något behov av att värma inifrån, eftersom blad och andra plantdelar är ganska tunna och vanlig uppvärmning, t ex genom flamning, fungerar bra.

Inträngningsförmågan hos mikrovågorna beror på frekvensen. En lägre frekvens ger bättre inträngning. Därför är 2450 MHz, som används i hushållsugnar, inte speciellt lämplig för bekämpning av frön i jord. Det vore bättre med vågor av lägre frekvens. Ibland har också 915 MHz använts i de redovisade försöken, vilket bör vara bättre. Val av frekvens regleras av bestämmelser, och för närvarande är bara 2450 MHz tillåtet i Sverige.

För ogräsfrön som ligger begravda i jord finns ingen annan icke-kemisk bekämpningsmetod. Där skulle mikrovågsbekämpning kunna fylla en viktig funktion. Vid bekämpning av ogräsfrön i jord vore det önskvärt att man kunde värma enbart fröna utan att värma omgivande jord. Tyvärr har det visat sig att det inte fungerar på det sättet, åtminstone inte vid 915 och 2450 MHz. Detta innebär att all jord kring fröna också måste värmas upp, vilket leder till att bekämpningsmetoden

blir mycket energikrävande. Dessutom är det så att jordens beskaffenhet (vattenhalt, jordtyp etc) kommer att avgöra behandlingsdjupet, det vill säga hur snabbt energin från mikrovågorna absorberas. Jorden på ett fält är ofta ojämn vilket kommer att leda till ojämnt behandlingsdjup. Man konstruerade mobila mikrovågsaggregat för ogräsbekämpning i fält i USA under 1970-talet. Tyvärr blev det stora och klumpiga konstruktioner med låg kapacitet. Det krävdes mycket kraftfulla generatorer för att klara strömförsörjningen till mikrovågsgeneratorerna.

En annan invändning mot mobila mikrovågsaggregat är att det är riskabelt att rikta vågorna ner mot marken, då det finns risk för att vågor kan reflekteras mot stenar och annat. Människor och djur som befinner sig i närheten riskerar då att exponeras för strålning.

Men det skulle kunna vara möjligt att lyfta upp jord med hjälp av elevatorer, behandla den i en tunnelugn och transportera tillbaka den till fåran igen. Då skulle man lösa säkerhetsproblemet och kunna behandla jorden utan att uppvärmningen blev ojämn. Tyvärr skulle en sådan maskin bli dyrbar och relativt komplicerad.

Mer troligt är att mikrovågor kan komma till användning vid behandling av planteringsjord. Jord som skall användas i planteringar och rabatter bör så långt möjligt vara fri från ogräsfrön och fri från rötter av rotoqräs. Om man har ogräsproblem redan vid etableringen av en ny plantering, så kommer det bli en ständig kamp mot ogräsen under hela planteringsens livslängd. Kampen blir dyrbar och sällan speciellt framgångsrik. En ogräsfri jord är därför mycket värdefull och mikrovågsbehandling skulle därför kunna vara en användbar metod i detta sammanhang.

I en stationär anläggning för jordbehandling skulle det vara möjligt att hantera säkerhetsproblemen. Anläggningar av liknande typ förekommer redan inom livsmedelsindustrin. En annan teknisk fördel är att man skulle kunna reglera jordens vattenhalt och sålla bort stenar för att få bästa möjliga resultat av mikrovågsbehandlingen.

REFERENSER

- Arlt, K. & Blumrich, H. 1991. The effect of ultra high frequency radiation on germination inhibition of seeds of weed species under laboratory conditions. EWRS Newsletter No 51, Oct.
- Ascard, J. 1988. Termisk ogräsbekämpning och blastdödning. Sveriges lantbruksuniversitet, Inst för lantbruksteknik. Rapport 130.
- Benz, W., Moosmann, A., Walter, H. & Koch, W. 1984. Wirkung einer Bodenbehandlung mit Mikrowellen auf Unkrautsamen, Nematoden und bodenbürtige Mikroorganismen. Mitteilung BBA 223, 128.
- Berndt, T. & Söderhjelm, P. 1991. Industriell mikrovågsvärmning. Opublicerat kursmaterial. Kan rekvireras från P. Söderhjelm Konsult AB, Box 19002, 104 32 Stockholm.
- Bhartia, P., Lebell, M. & Baron, J. 1977. Weed control with electromagnetic fields. Journal of microwave power 12, 52-54.
- Bigu-Del-Blanco, J., Bristow, J.M. & Romero-Sierra, C. 1977. Effects of low level microwave radiation on germination and growth rate in corn seeds. Proc. IEEE 65(7), 1086-1088.
- Champ, M.A., Davies, F.S. & Wayland, J.R. 1972. Ultra high-frequency electromagnetic radiation utilized for aquatic vegetation control. Proceedings of the Annual Conference of Southeastern Association of Game and Fish Commissioners. Vol 26, 418-420.
- Crawford, A.E. 1977. Phytotoxicity threshold levels of microwave radiation for Trifolium and Medicago seeds. Seed Science and Technology 5, 671-676.
- Davis, F.S., Wayland, J.R. & Merkle, M.G. 1971. Ultrahigh-Frequency Electromagnetic Fields for Weed Control: Phytotoxicity and Selectivity. Science 173, 535-537.
- Davis, F.S., Wayland, J.R. & Merkle, M.G. 1973. Phytotoxicity of a UHF Electromagnetic Field. Nature 241, 291-292.
- Diprose, M.F. 1978. Selective destruction of wild oats when mixed with cereal seeds by microwave irradiation. s. 70-72. Proc. Microwave Power Symposium, 28-30 juni. Ottawa, Canada. *Cit.* Diprose m fl, 1984.
- Diprose, M.F., Benson, F.A. & Willis, A.J. 1984. The Effect of Externally Applied Electrostatic Fields, Microwave Radiation and Electric Currents on Plants and Other Organisms, with Special Reference to Weed Control. The Botanical Review 50, 171-223.

Fergedal, S. 1993. Ogräsbekämpning genom frysning med flytande kväve och kolsyresnö. En jämförelse med flamning. Sveriges lantbruksuniversitet, Inst för lantbruksteknik. Rapport 165.

Highttower, N.C., Burdette, E.C. & Burns, C.P. 1974. Investigation of the use of microwave energy for weed seed and wood product insect control. Final Technical Report. Project E-230-901. June. Georgia Institute of technology, Atlanta, Georgia 30332, USA.

Höschle, H., Walter, H., Sanwald, E. & Koch W. 1981. Wirkung von Mikrowellen auf höhere Pflanzen und Schadorganismen. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz. Sonderheft IX, 421-429.

Höschle, H. 1984. Einfluss von Mikrowellen auf höhere Pflanzen und Bodenorganismen im Hinblick auf ihre Anwendung im Pflanzenschutz. Plits, 2. Verlag Josef Margraf, Stuttgart.

Kunisch, M., Hoffmann, P., Seefried, G. Arians, T. & Koch, W. 1992. Möglichkeiten des Einsatzes elektromagnetischer Strahlung zur Beseitigung von Pflanzenbewuchs auf Eisenbahngleisen. Z. PflKrankh. PflSchutz, Sonderh.XIII, 513-522.

Lal, R. & Reed, W.B. 1980. The effect of microwave energy on germination and dormancy of wild oat seeds. Canadian Agricultural Engineering, vol 22. No 1, 85-88.

Menges, R.M. & Wayland, J.R. 1974. UHF electromagnetic energy for weed control in vegetables. Weed Science 22, 584-590.

Moosmann, A. & Koch, W. 1988. Soil disinfection by microwaves with special reference to weed control. Weed control proceedings of a meeting of the EC Expert's Group, Stuttgart 28-31 oct 1986, 187-193.

Olsen, R.G. 1975. A theoretical investigation of microwave irradiation of seeds in soil. Journal of Microwave Power 10(3):281-296.

Rice, R.P. & Putnam, A.R. 1977. Some factors which influence the toxicity of UHF energy to weed seeds. Weed Science 25, 179-183.

Shafer, F. & Smith, D. 1974. Influence of Internal and External Moisture Levels on Toxicity of Microwaves to Seedlings. Meeting of the Weed Science Society of America. Abstract 224. North Texas State University, Denton, USA.

Svennebrink, J. Odaterad. Microwave heating. Broschyr från Institutet för mikrovågsteknik, Box 1084, 16421 Kista.

Vela, G.R., Wu, J.F. & Smith, D. 1974. Effect of 2450 MHz microwave radiation on some soil microorganisms in situ. *Soil Science* 121, 4451.

Wayland, J.R., Davies, F.S. & Merkle, M.G. 1973. Toxicity of an UHF device to plant seeds in soil. *Weed Science* 21, 161-162.

Wayland, J.R., Davies, F.S., Menges, R.M. & Robinson, R. 1975. Control of weeds with U.H.F. electromagnetic fields. *Weed Res.* 15:1-5.

Whatley, T.L., Wayland, J.R., Davis, F.S. & Merkle, M.G. 1973. Effect of soil moisture on phytotoxicity of microwave fields. *Proc. Southern Weed Science Society* 26, 389.

Whatley, t.l., Wayland, J.R. & Merkle, M.G. 1974. Factors affecting the phytotoxicity of microwave fields. (Abs.) *Proc. Southern Weed Science Society* 27, 344. *Cit. Diprose m fl* 1984.

Personliga meddelanden

Hansson, B.E. 1992. Fluxtec AB, Bruksvägen 2, 232 53 Åkarp

Svennebrink, J. 1989. Institutet för elektroelektronik, Box 1084, 164 21 Kista